

**ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE DE MASA PARA LA  
SIMULACIÓN DEL PROCESO DE REFINACIÓN DE FERRÓNÍQUEL EN  
HORNO CUCHARA DE CERROMATOSO S.A EMPLEANDO METSIM®**

**RAFAEL GUILLERMO ARDILA MONTERO**

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

**2010**

**ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE DE MASA PARA LA  
SIMULACIÓN DEL PROCESO DE REFINACIÓN DE FERRÓNÍQUEL EN  
HORNO CUCHARA DE CERRO MATOSO S.A EMPLEANDO METSIM®**

**RAFAEL GUILLERMO ARDILA MONTERO**

**Trabajo de práctica para optar el título de**

**Ingeniero Metalúrgico**

**Tutor**

**Ing. JULIO MARTIN SÁENZ QUECHO**

**Superintendente de Proceso de Refinería**

**Cerro Matoso-BHP BILLITON**

**Cotutor**

**PhD.MsC.Ing. GUSTAVO NEIRA ARENAS**

**Profesor de la Escuela de Ing. Metalúrgica y Ciencia de Materiales**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**

**BUCARAMANGA**

**2010**

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a:

A la empresa Cerro Matoso SA bhp billiton.

Julio Martín Sáenz Quecho, ingeniero metalúrgico superintendente de proceso de refinería, Cerro Matoso S.A., tutor de este trabajo.

Gustavo Neira Arenas, PhD.MsC.Ing Ingeniero Metalúrgico, profesor UIS, cotutor de este trabajo.

Mauro Sergio percovich, Ingeniero metalúrgico, Ingeniero residente industrias AVM.

Efrén Valdelamar, bases de datos y estadística de la unidad de negocios de Refinería de Cerro Matoso S.A.

Emerson Vega, Ingeniero metalúrgico, UIS.

Álvaro Barguil, Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana, Montería Córdoba.

David Brun Vergara, Estudiante de ingeniería mecánica, Universidad de los Andes.

Juan Carlos Amaya, Jaime remolina, Jesús delgado y Jaime Ortiz y estudiantes de ingeniería metalúrgica, universidad industrial de Santander.

Álvaro Vallejos Hernández, Departamento de ingeniería metalúrgica Universidad de concepción, Concepción Chile y Walter Orquera, Ingeniero Metalúrgico, CODELCO chile, planta de sólidos el salvador.

*A Dios, por ser nuestro creador, amparo y fortaleza, cuando más  
lo necesitamos, y por hacer  
Palpable su amor a través de cada uno de los que nos rodeó.*

*Sólo puedo combatir por lo que amo, amar sólo lo que respeto y a  
los sumo respetar sólo lo que conozco*

A mis padres Rafael y Esperanza, ellos son los artífices de toda mi vida.

A mi hermano Roger, por su ejemplo de vida.

Al profesor Gustavo Neira, por sus valiosas enseñanzas.

Al Ingeniero Julio Martin Sáenz, por su apoyo y valiosas enseñanzas en el área de la simulación de procesos.

A mi Abuelo Paterno Guillermo por la comprensión y apoyo moral.

A mi Abuelo Materno Isidro Montero, por sus Consideraciones.

A mis grandes amigos Mauro Percovich y Emerson Vega por estar en los momentos que más se necesitan los amigos.

A Leydi Johanna Lizarazu por toda su colaboración.

A mis amigos, Jesús, Jaime Ortiz, Juan Carlos, Jaime Remolina, Javier, Ambrosio, Mario, Edwin, Daren, Yurani, Fabián, Claudia, Mauricio, Orlando Serrano por pasar momentos inolvidables.

A la familia Aparicio por sus valiosas colaboraciones.

Rafael G.

## CONTENIDO

	Pag.
<b>INTRODUCCION</b>	14
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	16
<b>1.1. PROCESO DE REFINACIÓN DE FERRONÍQUEL</b>	17
1.1.1. Etapa de Oxidación	20
1.1.2. Etapa de desulfuración	23
1.1.2.1. Aluminotermia	24
1.1.3. Etapa de afino final	
	25
<b>1.2 RESUMEN GENERAL CONCEPTOS DE MODELAMIENTO Y SIMULACION</b>	25
1.2.1 Simulación	25
1.2.2 Modelo	25
1.2.3 Software de Simulación	25
1.2.3.1 Corrientes	26
1.2.3.2 Diagrama de flujo de procese “flowsheet“	26
1.2.4 Algoritmo	26
1.2.4.1 Método modular secuencial	26
1.2.4.2 Método orientado a ecuaciones	27
1.2.4.3 Método modular simultaneo	27
1.2.5 Control	27
1.2.5.1 Generalidades de la estrategia Feedback y Feedforward	
<b>1.3 RESUMEN INTRODUCTORIO AL SIMULADOR METSIM</b>	31
1.3.1 Generalidades	31
1.3.2 Tipo de Modelación en METSIM	32
1.3.3 Estrategia de Cálculo ejecutada por METSIM	34
1.3.4 Corrientes en METSIM	34
1.3.4.1 Descripción	34
1.3.4.2 Clasificación de las corrientes	35

<b>2. METODOLOGIA EMPLEADA</b>	36
<b>2.1 REVISION BIBLIOGRAFICA Y DEL ESTADO DEL ARTE</b>	37
<b>2.2 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE VARIABLES</b>	37
<b>2.3 ANÁLISIS DE DATOS Y COMPROBACIÓN DEL BALANCE DE MATERIALES DEL PROCESO</b>	37
<b>2.4 RESOLUCIÓN DEL MODELO E IMPLEMENTACIÓN CON METSIM™</b>	37
<b>2.5 VALIDACIÓN DEL MODELO CON DATOS REALES DE PLANTA</b>	38
<b>2.6 CREACION DE LA INTERFAZ EN EXCEL</b>	38
<b>2.7 ELABORACIÓN DEL TUTORIAL DE METSIM</b>	38
<b>3. MODELO REFINACION DE FERRONIQUEL</b>	39
<b>3.1 DESCRIPCION GENERAL DEL FLOWSHEET ENCONTRADO</b>	39
3.1.1 Etapa de Oxidación modelo previo	40
3.1.2 Etapa de Desulfuración modelo previo	42
3.1.3 Etapa de Afino final Modelo previo	45
3.1.4 Etapa de Escoriado modelo previo	46
<b>3.2 CURVAS DE REFINACION PARA EL MODELO PREVIO</b>	47
3.2.1 Variación del Silicio modelo previo	49
3.2.2 Variación del Fósforo modelo previo	49
3.2.3 Variación del Azufre modelo previo	50
3.2.4 Variación del Aluminio modelo previo	50
<b>4. AJUSTE DEL DIAGRAMA DE FLUJO Y DE LAS CURVAS DE REFINACION MEDIANTE CONTROLADORES FEEDBACK</b>	51
<b>4.1 AJUSTE DEL DIAGRAMA DE FLUJO</b>	51
4.1.2 Cambio de las unidades de operación	52
4.1.3 Establecimiento de la secuencialidad del proceso	52
4.1.4 Reacciones y establecimiento de factores para las unidades de operación establecidas	55
4.1.4.1 Etapa de Oxidación	55
4.1.4.2 Etapa de Desulfuración	56
4.1.4.3 Etapa de Afino Final	57
4.1.4.4 Etapas de Escoriado	58
4.1.4.5 Olla de Escoria	59
4.1.5 Inserción de las corrientes en el Flowsheet	59

4.1.5.1 Corrientes en la Etapa de Oxidación	60
4.1.5.2 Corrientes en la etapa de Escoriado de Oxidación	60
4.1.5.3 Corrientes en la etapa de Desulfuración	61
4.1.5.4 Corrientes en la etapa de escoriado de desulfuración	64
4.1.5.5 Corrientes en la Etapa de Afino Final	64
4.1.5.6 Corrientes en la Etapa de escoriado de Afino final	65
4.1.5.7 Corrientes de la Olla de Escoria (Stream Mixer)	65
<b>4.2 AJUSTE DE LAS CURVAS DE REFINACIÓN MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES FEEDBACK</b>	66
4.2.1 Ajuste curva de Refinación para el azufre	66
4.2.2 Ajuste curva de Refinación para el Aluminio	70
<b>5. CREACION DE LA INTERFAZ DE INTERCAMBIO DINAMICO DE DATOS ENTRE MICROSOFT EXCEL Y METSIM PARA EL FACIL INGRESO Y ANALISIS DE DATOS</b>	73
<b>5.1 VARIABLES CREADAS PARA LA IMPORTACION DE DATOS</b>	73
5.1.1 Ubicación de los valores importados en las corrientes	73
5.1.1.1 Función APL de ubicación de Valores importados desde Excel	74
<b>5.2 EXPORTACION DE DATOS</b>	76
<b>5.3 VISTA DE LA INTERFAZ</b>	77
5.3.1 Entradas	77
5.3.2 Salidas	78
<b>6. ELABORACIÓN DEL TUTORIAL DE METSIM</b>	79
<b>7. CONCLUSIONES</b>	80
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	82
<b>9.BIBLIOGRAFIA</b>	83

## LISTADO DE FIGURAS

	Pag
<b>Figura 1.</b> Diagrama de flujo del proceso de refinación de ferroníquel	11
<b>Figura 2.</b> Diagrama de Ellingham para algunos óxidos	14
<b>Figura 3.</b> Carga y descarga de flujo dentro de un tanque	23
<b>Figura 4.</b> Acción del controlador Feedback	24
<b>Figura 5.</b> Esquema de un modelo en METSIM	28
<b>Figura 6.</b> Esquema de la metodología empleada	31
<b>Figura 7.</b> Diagrama de flujo de proceso “flowsheet” previo	35
<b>Figura 8.</b> Representación Etapa de Oxidación modelo previo	35
<b>Figura 9.</b> Reacciones en la etapa de oxidación modelo previo	37
<b>Figura 10.</b> Representación etapa de desulfuración modelo previo	38
<b>Figura 11.</b> Reacciones en la etapa de desulfuración modelo previo	40
<b>Figura 12.</b> Representación etapa de afino final modelo previo	41
<b>Figura 13.</b> Etapa de Escoriado modelo previo	42
<b>Figura 14.</b> Variación del silicio modelo previo	44
<b>Figura 15.</b> Variación del Fósforo modelo previo	45
<b>Figura 16.</b> Variación del Azufre modelo previo	46
<b>Figura 17.</b> Variación del aluminio modelo previo	46
<b>Figura 18.</b> Ladle (Horno Cuchara)	47
<b>Figura 19.</b> Secuencialidad del proceso establecida	48
<b>Figura 20.</b> Reacciones en la simulación de la etapa de oxidación	51
<b>Figura 21.</b> Reacciones en la simulación de la etapa de afino final.	53
<b>Figura 22.</b> SPP Splitter Phase (SPP)	54
<b>Figura 23.</b> Factores de separación para los SPP	54
<b>Figura 24.</b> Flowsheet Completo del modelo de Refinación de Ferroníquel	55
<b>Figura 25.</b> Mecanismo de acción del controlador Feedback	63
<b>Figura 26.</b> Controladores Feedback en la etapa de desulfuración	64
<b>Figura 27.</b> Comparación de curvas de refinación para el azufre Real simulada con control- Simulada sin control	64
<b>Figura 28.</b> Reacciones controladas	65
<b>Figura 29.</b> Nueva corriente de cuantificación de oxígeno	67
<b>Figura 30.</b> Comparación de curvas de refinación para el Aluminio Real simulada con control- Simulada sin control	68
<b>Figura 31.</b> Programación de la función de ubicación de datos	72
<b>Figura 32.</b> Representación de los datos a ser ingresados en Excel	73
<b>Figura 33.</b> Representación de los Resultados en Excel	74

## LISTADO DE TABLAS

	Pag
<b>Tabla 1.</b> Descripción de las corrientes etapa de oxidación modelo previo	37
<b>Tabla 2.</b> Descripción de las corrientes etapa de desulfuración modelo previo	40
<b>Tabla 3.</b> Descripción de las corrientes etapa de afino final modelo previo	43
<b>Tabla 4.</b> Descripción de las corrientes etapa de escoriado modelo previo	44
<b>Tabla 5.</b> Tipos de muestras tomadas en el proceso de refinación de ferróníquel	45
<b>Tabla 6.</b> Reacciones para las sub etapas de Calentamiento y Desoxidación	53
<b>Tabla 7.</b> Reacciones para las sub etapas de Desulfurada y ajuste de azufre.	54
<b>Tabla 8.</b> Corrientes en la etapa de Oxidación	57
<b>Tabla 9.</b> Corrientes en la etapa de escoriado de oxidación	57
<b>Tabla 10.</b> Corrientes en la etapa de Desulfuración Sub etapa de calentamiento	58
<b>Tabla 11.</b> Corrientes en la etapa de Desulfuración Sub etapa de Desoxidación.	59
<b>Tabla 12.</b> Corrientes en la etapa de Desulfuración Sub etapa de Desulfurada	60
<b>Tabla 13.</b> Corrientes en la etapa de Desulfuración Sub etapa de ajuste de azufre.	60
<b>Tabla 14.</b> Corrientes en la etapa de escoriado de desulfuración	61
<b>Tabla 15.</b> Corrientes en la etapa de escoriado de afino final.	61
<b>Tabla 16.</b> Corrientes en la etapa de escoriado de Afino final	62
<b>Tabla 17.</b> Corrientes de la olla de escoria	62

## RESUMEN

### TÍTULO:

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE DE MASA PARA LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE REFINACIÓN DE FERRÓNÍQUEL EN HORNO CUCHARA DE CERROMATOSO S.A EMPLEANDO METSIM®

### AUTOR:

Rafael Guillermo Ardila Montero \*\*.

### PALABRAS CLAVES:

Balance de masa, simulación de procesos, controlador Feedback refinación de ferróníquel, Cerro Matoso S.A.

### DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO:

Debido a las confusiones generadas por el diagrama de flujo de proceso existente en el simulador METSIM para el modelo correspondiente a la refinación de ferróníquel y la dispersión existente entre las curvas de refinación simuladas respecto a las curvas de refinación realizadas con los datos reales entregados por el laboratorio de CMSA, se vio la necesidad de realizar un estudio con el objetivo de ajustar el diagrama de flujo de proceso en base a la secuencialidad del proceso en la actualidad y el ajuste de las curvas de refinación, para con ello obtener datos más exactos en cuanto al balance de masa se refiere, con la ayuda del simulador METSIM. Luego de implementar diversos ajustes se pudo demostrar que la curva de variación de azufre fue ajustada mediante la implementación de una estrategia de control basada en el concepto de retroalimentación (Feedback), con ello se observó que tan solo el 24 por ciento del CaO reacciona con el azufre y el 44 por ciento del CaSi reacciona con el mismo elemento, haciendo de la desulfuración una etapa poco eficiente, por lo cual Cerro Matoso SA estudia la posibilidad rediseñar la etapa de desulfuración.

---

\* Trabajo de grado

\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Tutor: Julio M. Sáenz Quecho. M.Sc. Cotutor: Gustavo Neira PhD.MsC.Ing.

## INTRODUCCION

Debido a las confusiones generadas por el diagrama de flujo de proceso existente en el simulador METSIM para el modelo correspondiente a la refinación de ferróníquel y la dispersión existente entre las curvas de refinación simuladas respecto a las curvas de refinación realizadas con los datos reales entregados por el laboratorio de CMSA, se vio la necesidad de realizar un estudio con el objetivo de ajustar el diagrama de flujo de proceso en base a la secuencialidad del proceso en la actualidad y el ajuste de las curvas de refinación, para con ello obtener datos más exactos en cuanto al balance de masa se refiere, con la ayuda del simulador METSIM.

Para el caso específico de este trabajo, se analiza el modelo existente del proceso de Refinación de Ferróníquel realizado en el software comercial de simulación de procesos metalúrgicos llamado METSIM® (*Metallurgical Simulator*), y se proponen alternativas de solución en base a los requerimientos actuales desde el punto de vista del balance de masa. Dichas alternativas de solución se centran principalmente en la modificación del diagrama de flujo del proceso (Flowsheet) así como la implementación de una estrategia de control para analizar el consumo de algunos reactivos (Mezcla desulfurante y aluminio para desulfurar) en una etapa tan importante como lo es la desulfuración del baño de metal, también para observar la variación en la concentración de las impurezas dentro de la marcha del proceso de refinación.

Además con el fin de ahorrar tiempo en el ingreso de datos al simulador se diseñó e implementó una interfaz de usuario que permite intercambiar datos entre METSIM® y Microsoft Excel® con base al lenguaje del software

APL (*A Programming Language*). Tal interfaz también permite el análisis de los resultados generados numéricamente.

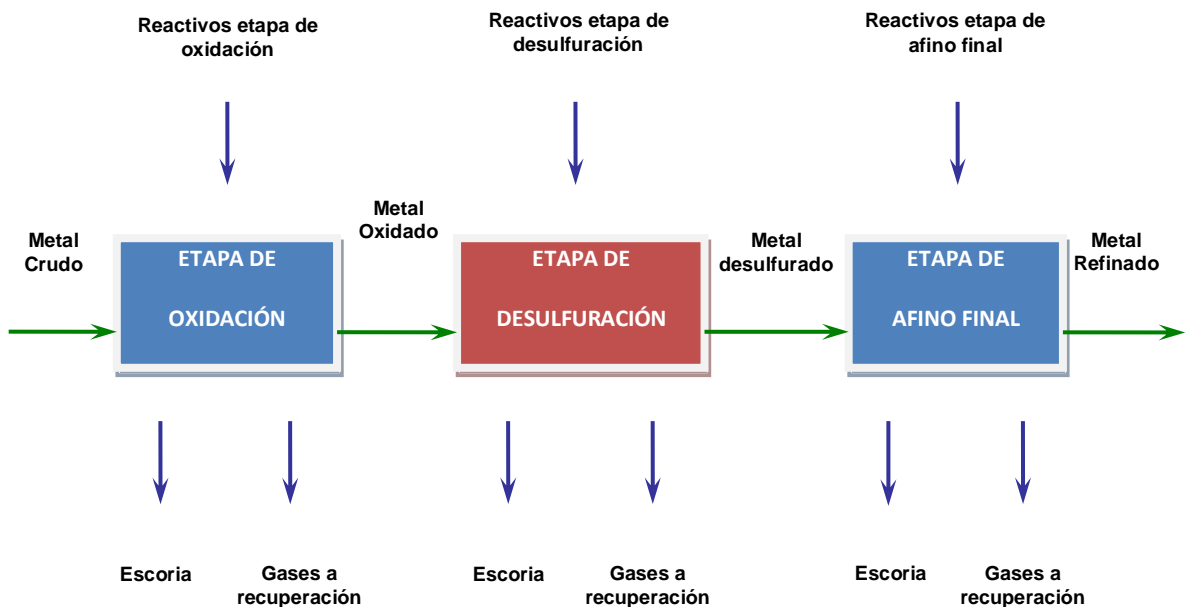
Por último se creó un completo tutorial del funcionamiento del software en español.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. PROCESO DE REFINACIÓN DE FERRONÍQUEL

El proceso de refinación de ferroníquel tiene como finalidad recibir el metal líquido y crudo proveniente de los hornos eléctricos (donde se lleva a cabo el proceso de reducción) y transformarlo tanto física como químicamente, para obtener al final ferroníquel refinado y con composición química dentro de las especificaciones de calidad establecidas para su venta .

Es decir el proceso de refinación consiste en ajustar la composición química del ferroníquel, modificando principalmente los contenidos de azufre, carbono, silicio y fósforo presentes en el baño metálico, para llevarlos a los niveles de aceptación.



**Figura 1.** Diagrama de flujo del proceso de refinación de ferroníquel

Durante el proceso de refinación se genera tanto escoria (que es entregada a la planta de recuperación de metal) como gases que son atrapados por el sistema captador de partículas, donde los polvos ricos en níquel son purificados y enviados a la etapa de preparación de mineral.

Antes de verter el metal líquido y crudo en los crisoles, estos son precalentados para evitar daños por choque térmico en el refractario. Una vez vertido el metal líquido, se pesa y se transporta a la estación de refinación, donde se encuentra el horno eléctrico de crisol.

En general el proceso de refinación como tal consta de las etapas de oxidación, desulfuración y afino final (figura 1).

### **1.1.1. ETAPA DE OXIDACIÓN**

En esta etapa se recibe el metal crudo y pesado, y se extraen las impurezas tales como el carbono y el fósforo, mediante un soplo con oxígeno gaseoso a través de una lanza refractaria.

Para proteger el refractario de los crisoles, la escoria generada es neutralizada mediante la adición de dolomita y en algunos casos, también de mezcla desulfurante (constituida principalmente de CaO).

A la salida se obtiene ferroníquel oxidado, es decir con un contenido relativamente alto de oxígeno, y escoria rica en FeO y CaO, la cual es removida mediante el uso de una rastra con accionamiento hidráulico.

El proceso de oxidación está regido por la facilidad con que se oxidan las impurezas presentes en el baño, es decir por la afinidad de estas por el oxígeno. De esta manera, se oxidarán fácilmente, aquellos elementos que

presenten una elevada afinidad por el oxígeno. Elementos como el calcio, magnesio, aluminio y titanio tienen afinidades muy altas, por lo cual estos elementos se oxidarán muy rápidamente si están presentes en forma metálica.

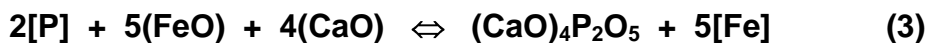
Durante la etapa de oxidación se presentan principalmente las siguientes reacciones:



El silicio se oxida muy fácilmente y el  $\text{SiO}_2$  formado es un óxido no metálico muy ácido.



Por su parte el  $\text{P}_2\text{O}_5$  es también un óxido ácido no metálico. Debido a que este óxido es inestable, debe ser retenido por medio de la adición de un fundente básico como el  $\text{CaO}$ . La reacción queda:



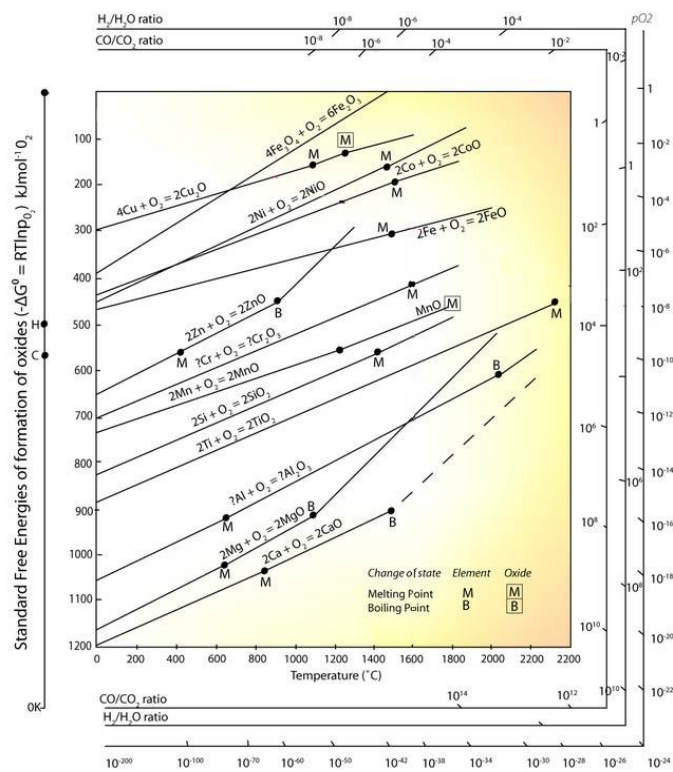
El carbono se elimina parcialmente por oxidación según la ecuación:



Parte del hierro del baño también se oxida según la reacción:



Una elevada oxidación del hierro del baño, genera un menor rendimiento del horno eléctrico.



**Figura 2.** Diagrama de Ellingham para algunos óxidos: H. J. T., J Soc Chem Ind

Los elementos como el cromo, vanadio y manganeso se eliminan de forma parcial por oxidación, mientras que los elementos como el níquel, cobre, estaño y plomo permanecen en el baño.

Los óxidos generados a partir de los elementos Si, P, Cr, Mn y Fe, pasan a la escoria, la cual debido a su insolubilidad con el metal y a su menor densidad flota sobre el baño, mientras que el carbono sale con los gases principalmente como monóxido de carbono.

En el diagrama de Ellingham para óxidos (figura 2) se puede observar la facilidad relativa para formar los diferentes óxidos a partir de los elementos contenidos en el baño. En este diagrama se puede observar que elementos como el magnesio y el calcio se oxidarán fácilmente aún a muy bajos potenciales de oxígeno, a diferencia de elementos como el cobalto que requieren de elevados potenciales de oxígeno para poder ser eliminados por oxidación.

Durante todo el proceso de refinación, el baño de metal es homogenizado utilizando un mecanismo de agitación magnética y mediante la inyección de nitrógeno gaseoso a través de una lanza refractaria.

### **1.1.2. ETAPA DE DESULFURACIÓN**

El proceso de desulfuración consiste en extraer el azufre disuelto en el baño, para llevarlo desde valores cercanos a 0.5% hasta niveles inferiores a 0.09% [1]. Para que esto pueda llevarse a cabo, el S debe reducirse según la siguiente ecuación general:



De esta manera el ión sulfuro formado debe ser atrapado por un catión metálico, que para nuestro caso es el  $\text{Ca}^{+2}$  (provisto con el CaO de la mezcla desulfurante). Para que pueda ocurrir la desulfuración, es necesario que el baño metálico este completamente desoxidado (condiciones reductoras), para esto se agrega ferrosilicio al baño, de esta manera el oxígeno no oxidará el calcio provisto por el CaO.

Los electrones requeridos para la reducción del azufre son suministrados por el ión  $\text{O}^{-2}$ , de esta manera la ecuación queda:



El  $\text{O}^{-2}$  proviene de la disociación de la cal y la ecuación queda:



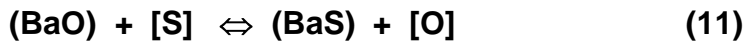
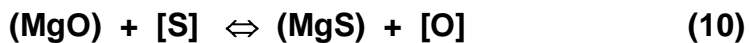
Como se observa, esta reacción produce oxígeno, entonces para mantener la atmosfera reductora se emplea aluminio el cual atraparé este oxígeno formado, de otra manera el oxígeno reaccionará con el calcio del sulfuro y el azufre pasará nuevamente al baño.

Para desoxidar el baño se utilizan elementos que tengan una alta afinidad por el oxígeno, tales como el aluminio y el silicio, como se muestra en el

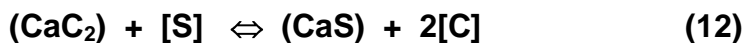
diagrama de Ellingham, estos elementos están ubicados en la parte inferior del diagrama y sus óxidos son muy estables, de ahí su implementación.

Para nuestro proceso en particular se utiliza el aluminio en lingotes de 100kg y/o aluminio en alambrón, y para agregar silicio se emplea ferrosilicio y/o calciosilicio ambos en alambrón.

La desulfuración también puede realizarse utilizando otros cationes como el  $\text{Na}^+$  (Utilizando  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ),  $\text{Mg}^{+2}$  (utilizando  $\text{MgO}$ ) o  $\text{Ba}^{+2}$  (empleando  $\text{BaO}$ ), entre otros:



También se puede adicionar Ca a partir del  $\text{CaC}_2$ , según la reacción:



En todos estos casos se cumplen las siguientes condiciones:

- Existe la presencia de un donante de electrones.
- Existe la presencia de una sustancia capaz de ligar químicamente al ión sulfuro y formar con este una sustancia de menor densidad capaz de emerger de la fase metálica.

De los sulfuros formados a partir de estos cationes, el CaS es uno de los más estables, además el  $\text{Ca}^{+2}$  se consigue fácil y económicamente a partir del CaO, de allí su implementación.

Para que la desulfuración ocurra, también se requiere que la temperatura del baño sea superior a  $1590^{\circ}\text{C}$  y para nuestro caso que la escoria sea rica en CaO, para que de esta manera se pueda formar el CaS, que es la forma como el azufre puede ser extraído del metal y desplazado a la escoria.

#### **1.1.2.1. Aluminotermia**

Como se dijo anteriormente para que el proceso de desulfuración pueda llevarse a cabo se necesita aumentar la temperatura del baño metálico hasta alcanzar temperaturas por encima de los  $1590^{\circ}\text{C}$ , para lograr esto se emplean dos tipos de calentamiento, uno mediante la utilización del horno eléctrico de crisol ASEA, y el otro aprovechando la reacción altamente exotérmica entre el oxígeno y el aluminio, más conocida como aluminotermia:



La reacción de aluminotermia también se emplea para obtener metales, partiendo de aluminio y un óxido del metal, para de esta manera obtener el metal del óxido y óxido de aluminio. En este caso igualmente se libera una elevada cantidad de energía.

### **1.1.3. ETAPA DE AFINO FINAL**

En la etapa de afino final se recibe el metal desulfurado, pero con el contenido de azufre aún por encima de las especificaciones de calidad. Para disminuir el contenido de azufre en el baño metálico, se adiciona calsiosilicio en alambón, de acuerdo con una fórmula preestablecida, conjuntamente se ajusta el porcentaje de silicio, utilizando ferrosilicio, el cual debe quedar cerca de 0.4% para lograr una buena fluidez del metal líquido en el proceso de granulación.

En esta etapa también se inyecta oxígeno para ajustar el contenido de este en el metal, e igualmente para lograr una buena fluidez en la granulación.

Al final se obtiene ferroníquel con una composición química acorde con las especificaciones de calidad.

## **1.2 RESUMEN GENERAL CONCEPTOS DE MODELAMIENTO Y SIMULACION**

### **1.2.1 Simulación**

Una simulación es la recreación de un proceso, que se da en la realidad mediante la construcción de un modelo, que resulta de ciertas aplicaciones específicas, es decir La simulación es reproducir el ambiente, las variables (rasgos, apariencia, características, contexto) de un sistema real. Es imitar una situación del mundo real en forma matemática. O escrito de una forma más estricta una Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

### **1.2.2 Modelo**

Un modelo es una representación de un objeto, sistema o idea, de forma diferente al de la entidad misma. El propósito de los modelos es ayudarnos a explicar, entender o mejorar un sistema. Un modelo de un objeto puede ser una réplica exacta de éste o una abstracción de las propiedades dominantes del objeto.

### **1.2.3 Software de Simulación**

Este es una aplicación computarizada y programada, que nos permite evaluar modelos diseñados por un usuario y aplicado a un proceso o una situación específica. Como similitud entre los diversos software de simulación de procesos encontramos términos tales como Flowsheet y corrientes los cuales se explicaran a continuación.

### **1.2.3.1 Corrientes**

También conocidas como *Streams*, son las flechas que indican la entrada (Input) o salida (Output) de materias primas y productos a las operaciones unitarias (Equipos).

### **1.2.3.2 Diagrama de flujo de proceso “flowsheet“**

Este término hace referencia al conjunto total de operaciones unitarias (equipos) unidos mediante las respectivas corrientes. En otras palabras es el diagrama de flujo del proceso completo.

### **1.2.4 Algoritmo**

Este término hace referencia a es una lista bien definida, ordenada y finita de operaciones que permite hallar la solución a un problema. Dado un estado inicial y una entrada, a través de pasos sucesivos y bien definidos se llega a un estado final, obteniendo una solución. Para el caso de la simulación de procesos en estado estacionario, el modelo matemático del proceso está constituido, en general por un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales para cuya solución existen tres algoritmos: el método secuencial modular, el método orientado a ecuaciones, y el método modular simultáneo.

#### **1.2.4.1 Método modular secuencial**

Implica la implementación del diagrama de flujo del proceso como un grupo de unidades de proceso (equipos) para cada uno de los cuales existen

subrutinas de cálculo o módulos. Para el caso de METSIM este simulador emplea este método para la realización de los balances de masa y energía ya que este cuenta con una biblioteca de módulos que puede ser usada para simular una gran diversidad de diagramas de flujo de proceso en una estructura flexible.

#### **1.2.4.2 Método orientado a ecuaciones**

Consiste básicamente en la solución simultánea de las ecuaciones que describen el diagrama de flujo, es decir, resolver el enorme sistema de ecuaciones algebraicas no lineales que constituyen el modelo matemático del proceso completo por algún procedimiento de solución de sistemas de ecuaciones.

#### **1.2.4.3 Método modular simultáneo**

Este método intenta aprovechar algunas ventajas de los dos métodos anteriormente descritos. Este usa la estructura modular tradicional, pero a su vez se resuelve un sistema de ecuaciones simultáneas incluyendo todas las variables de las corrientes. La diferencia principal consiste en que el sistema de ecuaciones a resolver es un sistema simplificado de más fácil solución que el sistema de ecuaciones que resolvería en el método orientado a ecuaciones.

### **1.2.5 Control**

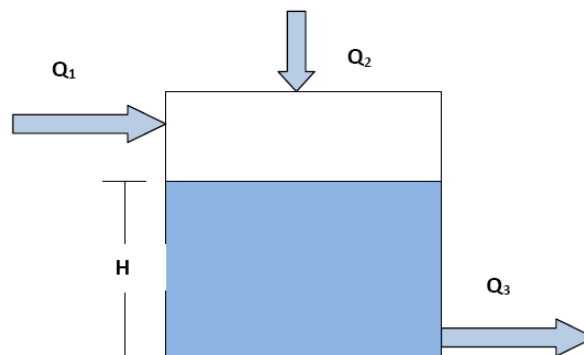
Según la teoría de control, vamos a encontrar que surgen dos conceptos básicos y que hacen referencia a las estrategias de control mayormente aplicadas a nivel mundial, estos son el mecanismo de control Feedback (Retroalimentación) y Feedforward (Pre alimentación)

Antes de dar la explicación de estas estrategias de control analicemos primero el concepto de perturbación. Una perturbación no es otra cosa que algún parámetro externo que incide en el funcionamiento de un sistema alterándolo. Como en todos los estudios el concepto de variable juega un papel importante, convirtiéndose una perturbación en una variable externa que afecta directamente variables propiamente dichas del sistema.

### 1.2.5.1 Generalidades de la estrategia Feedback y Feedforward

La principal diferencia de estas estrategias de control, es la forma de actuar directamente sobre el sistema. El siguiente ejemplo nos recrea mejor estos conceptos:

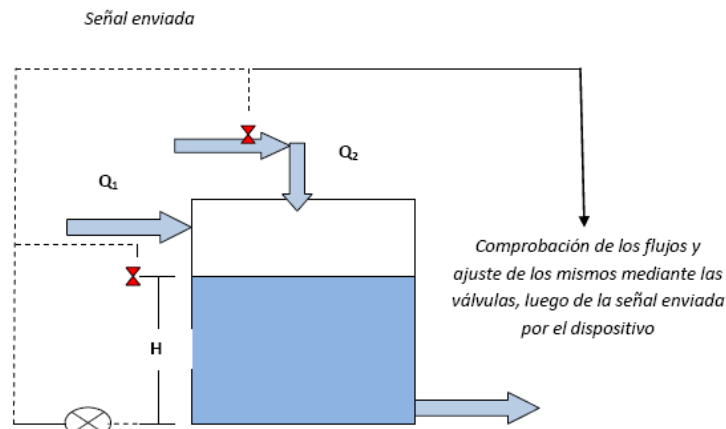
Supongamos que se desea mantener constante la altura del líquido dentro del tanque el cual tiene conectado una línea de entrada de flujo y una línea de descarga de flujo como lo muestra la figura 3:



**Figura 3.** Carga y descarga de flujo dentro de un tanque

Es en este punto donde nos preguntamos ¿cuáles son las variables a controlar y a ajustar? ¿Cuáles son las posibles perturbaciones que pueden hacer que la altura aumente o disminuya? , bueno si analizamos detalladamente el sistema el principal factor que puede variar la altura dentro del tanque es el aumento o disminución de los caudales del líquido en la entrada.

Desde el punto de vista del mecanismo de control Feedback para poder mantener H constante tendríamos que monitorear la altura del tanque con algún dispositivo, para que inmediatamente se detecte una variación del valor establecido para H constante (*Setpoint*), la estrategia de control indague acerca de cuál de los flujos de entrada a experimentado aumento o disminución del caudal el cual será “ajustado” mediante la implementación de una válvula, la cual se abrirá en el caso de que el caudal disminuya , de tal forma que la altura permanecerá constante. En la figura 4 se observa mejor como es la actuación de la estrategia



**Figura 4.** Acción del controlador Feedback

Como se puede observar para que la estrategia responda ante la perturbación, debe existir una lectura de la desviación de la variable que se está controlando, y esa es la principal diferencia que encontramos con respecto a la estrategia de control Feedforward, ya que esta última es una pre alimentación es decir, con anterioridad se deben saber que perturbaciones pueden afectar al sistema para que esta responda de una forma satisfactoria y no deje alterar el sistema, es decir en esta estrategia no hay una medición de una desviación de un valor deseado, si no que existe una pre alimentación de las perturbaciones, por lo tanto deben prepararse actuaciones que deben aplicarse para mantener en este caso la altura constante. Ejemplo de ello podemos citar como ilustración el siguiente caso: Se sabe que para que nunca cambie la altura dentro del tanque el caudal  $Q_1$  debe ser tres veces  $Q_2$ , es decir de antemano sabemos que para que la altura no cambie debe cumplirse la siguiente relación:  $Q_1 = 3 Q_2$  De tal forma que las válvulas antes de iniciar el sistema deben ajustarse para dicha relación de caudales se cumpla. De lo anteriormente visto se pueden definir para el control Feedback conceptos fundamentales como lo son Setpoint, Variable ajustada, variable controlada, los cuales se explicaran a más detalle a continuación. Los términos comúnmente empleados en las estrategias de control son:

- **Variable Ajustada:** Es la variable que vamos a calcular con base en el establecimiento de un Setpoint
- **Variable Controlada:** Es la variable que se está controlando, asignando su valor al Setpoint.

- **Setpoint:** Es el valor deseado.

## 1.3 RESUMEN INTRODUCTORIO AL SIMULADOR METSIM

### 1.3.1 Generalidades

METSIM es un software de simulación útil para modelar complejas plantas de producción de metales vía extracción desde su mineral. Ejemplo de ello podemos simular plantas de beneficio de minerales, procesos metalúrgicos donde ocurren reacciones químicas y debido a la normatividad mundial de cuidado del medio ambiente, nos da la opción de simular procesos de recuperación y limpieza del entorno. Este software fue desarrollado por Mr. John Bartlett y su licencia puede conseguirse por medio de la empresa PROWARE. METSIM trabaja con una llave USB tipo centinela la cual debe conectarse al PC para que METSIM pueda trabajar en su versión Full, si la llave no es conectada el usuario solo podrá trabajar con la versión demo la cual tiene capacidades limitadas.

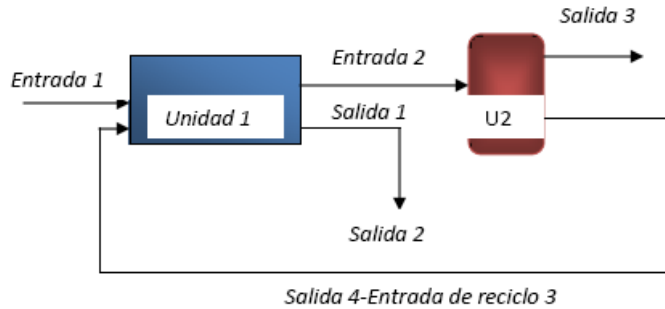
Una de las novedades de este software y su diferencia con otros es el lenguaje en el cual fue desarrollado, el cual es conocido como APL (*A Programming Language*) lenguaje de alto nivel muy potente, el cual nos permite desarrollar bastas operaciones matemáticas con pequeñas líneas de código si lo comparamos con otros lenguajes como por ejemplo el lenguaje C o Visual Basic. Como ya se mencionó este software es vendido por la empresa PROWARE en distintos módulos, dependiendo de las necesidades

del usuario, los módulos básicos son el modulo de balances de masa y el modulo de balance de energía. Para el presente trabajo se empleó el modulo de balance de masa.

METSIM presenta como punto fuerte una muy completa base de datos termodinámicos para los más comunes compuestos que se tratan en plantas metalúrgicas, además de ofrecernos la posibilidad de crear interfaces con otros programas como por ejemplo con Microsoft Excel. Algo que hay que tener en cuenta es que METSIM no predice reacciones químicas, no nos da información acerca de la cinética de los procesos ni tampoco de equilibrios termodinámicos establecidos. Entonces como podemos ver básicamente este software es muy útil en la consecución de balances de masa y energía de sistemas bastante complejos.

### **1.3.2 Tipo de Modelación en METSIM**

Los modelos que construimos en METSIM, se puede decir que son modelos de adquisición de datos, donde vamos a tener una serie de entradas y por ende unas salidas, a estas entradas y salidas se les conoce en el lenguaje de la ingeniería de procesos como corrientes y estas van a estar relacionadas mediante una unidad de operación u operación unitaria que puede o no ser reccionante la cual simula el equipo donde se lleva a cabo determinado proceso. Al acoplamiento de distintas corrientes con distintas operaciones unitarias se le conoce como Flowsheet o diagrama de flujo del proceso. La figura 5 recrea mejor la estructura de un modelo realizado en METSIM.



**Figura 5.** Esquema de un modelo en METSIM

Como podemos observar, la figura de arriba es un Flowsheet, en el cual podemos distinguir las entradas y las salidas, hay que tener presente que en la caso de la salida 1 para la unidad 1, se convierte en una entrada (2) para la unidad 2, también podemos apreciar que de la unidad 2 sale una corriente que es reingresada a la unidad 1, a este tipo de corrientes se les conoce como corrientes de reciclo.

Como se mencionó anteriormente las unidades de operación pueden o no ser reaccionantes, esto indica que pueden o no llevarse reacciones químicas dentro de ellas, es en ese punto donde entra la habilidad del modelador para distinguir cuando se lleva una etapa física o química.

### **1.3.3 Estrategia de Cálculo ejecutada por METSIM**

METSIM es un software que trabaja mediante una estrategia de cálculo basada en iteraciones secuenciales, las cuales son complementadas por el algoritmo de aceleración de convergencia de *Wegstein* para garantizar tiempos de convergencia relativamente pequeños. Además como es sabido cuando se trabaja mediante esta estrategia se debe establecer un margen de tolerancia la cual nos marca la exactitud de nuestros resultados. Y como se mencionó anteriormente el algoritmo general de cálculo ejecutado por METSIM es el método secuencial modular para el cual existen subrutinas de cálculo para cada una de las unidades de operación.

### **1.3.4 Corrientes en METSIM**

#### **1.3.4.1 Descripción**

Como se mencionó anteriormente las corrientes son aquellas líneas que interconectan las distintas operación e unitarias, esto visto desde el punto de vista del Flowsheet, desde el punto de vista del modelo como tal , las corrientes representan flujos característicos los cuales contienen una o más fases con sus distintos elementos que conforman los compuestos de nuestro sistema . Ellas son las que reflejan directamente los resultados calculados por METSIM, además de servir como fuente de ingreso de datos.

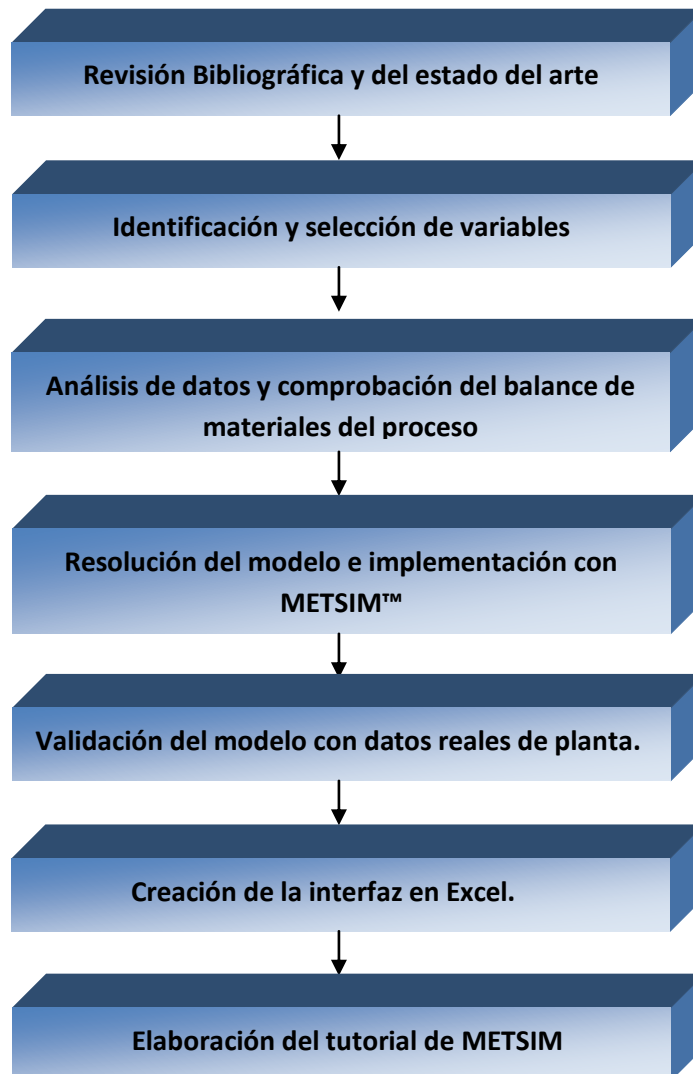
#### 1.3.4.2 Clasificación de las corrientes

La clasificación de las corrientes es bastante sencilla, existen 3 tipos de corrientes las cuales se definen a continuación:

- **Corrientes de Entrada o Inputs:** son aquellas corrientes que ingresan a una operación unitaria.
- **Corrientes de salida u Outputs:** son aquellas que abandonan la operación unitaria.
- **Corrientes de reciclaje o Recycle Stream:** son aquellas que abandonan una operación unitaria e ingresan a una operación unitaria anterior.

## 2. METODOLOGIA EMPLEADA

En la figura 6 se muestra el esquema general de la metodología empleada.



**Figura 6.** Esquema de la metodología empleada

## **2.1 REVISION BIBLIOGRAFICA Y DEL ESTADO DEL ARTE**

En esta etapa del proyecto se llevó a cabo la revisión y selección del material bibliográfico que se empleó para la elaboración de este trabajo. Se utilizó todo tipo de literatura: como libros de procesos de oxido reducción, reducción y refinación en la fase liquida, modelamiento y simulación de procesos químicos, refinación de hierro en horno de cuchara, manuales de proceso y operación de Cerro Matos SA.

## **2.2 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE VARIABLES**

En esta etapa del proyecto se identificaron las posibles causas de dispersión entre las curvas de refinación y se analizaron los parámetros que iban a ser fijados dentro del modelo existente de refinación de ferroníquel, además se bosquejó el nuevo flowsheet a ser implementado.

## **2.3 ANÁLISIS DE DATOS Y COMPROBACIÓN DEL BALANCE DE MATERIALES DEL PROCESO**

En esta etapa del proyecto se construyeron las gráficas de comparación entre la marcha normal del proceso y las generadas por el simulador.

## **2.4 RESOLUCIÓN DEL MODELO E IMPLEMENTACIÓN CON METSIM™**

En esta etapa se realizó la reestructuración del Flowsheet en base a la secuencia normal del proceso de refinación de Ferroníquel y se implemento una estrategia de control Feedback para analizar y ajustar las curvas de desulfuración (etapa crítica en la refinación) así como para ajustar del

porcentaje de aluminio durante la marcha secuencial del proceso, todo en base a las exigencias de Cerro Matoso SA.

## **2.5 VALIDACIÓN DEL MODELO CON DATOS REALES DE PLANTA**

En esta etapa se llevó a cabo la prueba del flowsheet y la funcionalidad y convergencia de los controladores Feedback en base a datos reales de planta para con ello construir las nuevas curvas de refinación para la comparación con las generadas por el simulador anteriormente.

## **2.6 CREACION DE LA INTERFAZ EN EXCEL**

En esta etapa del proyecto debido al considerable tiempo que tomaba ingresar y analizar datos del simulador, se procedió a construir una interfase amigable en Microsoft Excel, donde se pueden exportar e importar datos a METSIM en base a la creación de variables escalares y vectoriales, las cuales entran en juego intercambiando datos entre los dos software mediante la programación de una función en APL.

## **2.7 ELABORACIÓN DEL TUTORIAL DE METSIM**

Al ver la necesidad de tener algún material que explicara el funcionamiento básico del simulador y la forma de programar algunas funciones en APL de una forma sencilla y en español, se decidió escribir un completo manual el cual no solo contiene términos de METSIM si no que se hace una breve explicación de conceptos generales de simulación y control de procesos.

### 3. MODELO REFINACION DE FERRONIQUEL

#### 3.1 DESCRIPCION GENERAL DEL FLOWSHEET ENCONTRADO

El diagrama de flujo de proceso “flowsheet” de la refinación (Modelo previo) constaba de varios equipos de separación de fases o *splitter Phases* (SPP), los cuales debido a la flexibilidad de METSIM permiten la simulación de un equipo reaccionante donde además se aprovecha el hecho de que estos equipos constan de varias entradas y salidas, donde se establecen las reacciones que ocurrirían dentro de cada una de las etapas, como lo podemos observar en la figura 7:

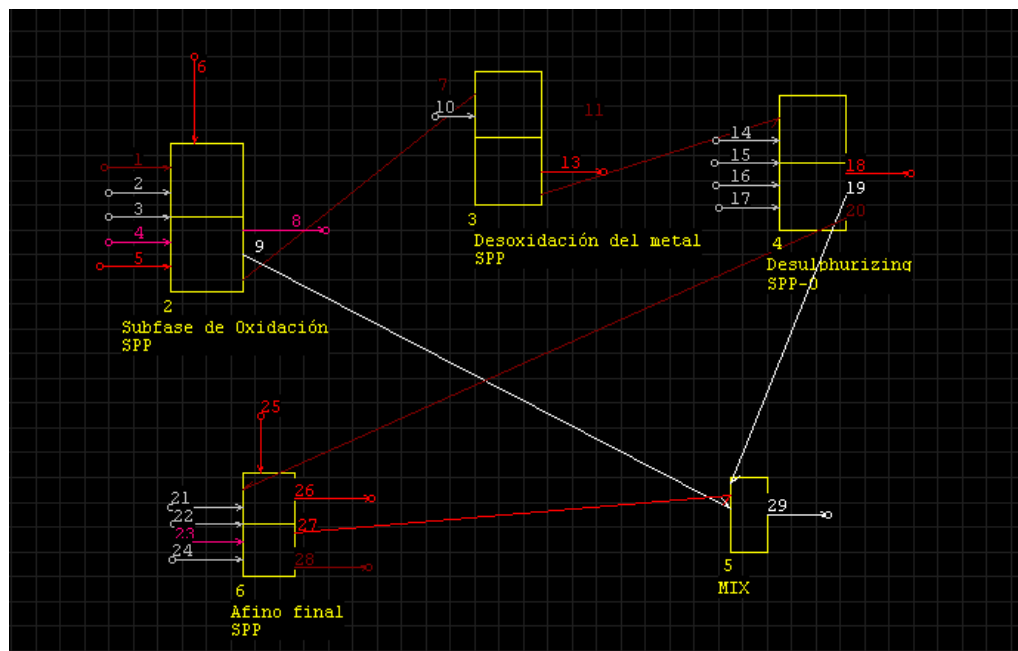
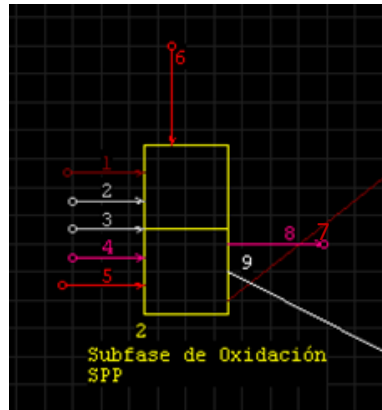


Figura 7. Diagrama de flujo de proceso “flowsheet” previo

Por separado podemos observar la descripción de las corrientes:

### 3.1.1 Etapa de Oxidación modelo previo



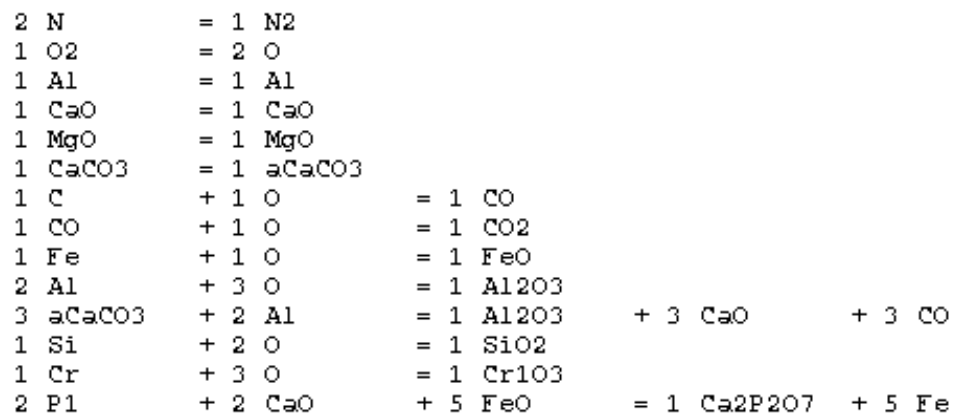
**Figura 8.** Representación Etapa de Oxidación modelo previo

Numero Corriente	Descripción
1	Ferróníquel crudo
2	Dolomita
3	Mezcla Desulfurante
4	Oxígeno para Oxidar
5	Corriente Vacía Extra
6	Corriente Vacía Extra
7	Ferróníquel Oxidado
8	Gases Generados
9	Escoria Generada

**Tabla 1.** Descripción de las corrientes etapa de oxidación modelo previo

En esta etapa se simula la oxidación de impurezas en el ferróniquel como lo es por ejemplo el carbono y el fósforo, se sabe que la escoria de oxidación es de naturaleza ácida y como el refractario que recubre la cuchara es de naturaleza básica este debe protegerse con Dolomita para evitar el ataque químico, por otra parte cuando el porcentaje de fósforo en el ferróniquel crudo supera determinado valor debe adicionarse al baño mezcla sintética para desulfurar (CaO 85%-MgO15%) para con ello lograr la formación del fosfato de calcio y evitar que el fósforo se redissuelva en el baño de metal, por último también se observa en la figura la inyección de oxígeno que es el que directamente oxida las impurezas.

Donde las reacciones que se dan en esta etapa se muestran en la figura 9



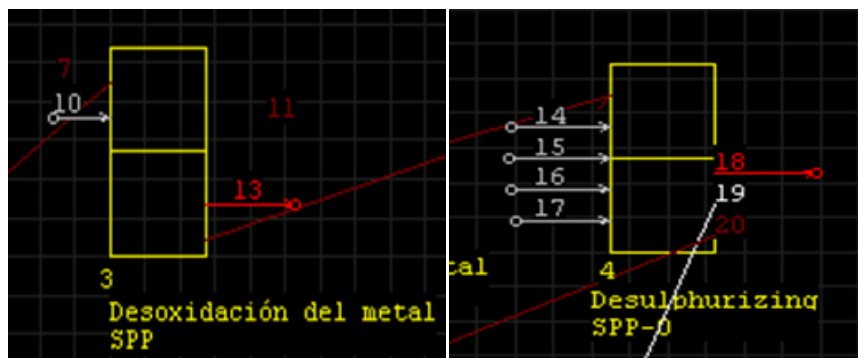
**Figura 9.** Reacciones en la etapa de oxidación modelo previo

Reacciones que fueron establecidas por el ingeniero Julio Martín Sáenz Quecho, en su maestría y las cuales se ejecutan perfectamente con muy buenos resultados.

En relación con las corrientes de salida se puede observar que vamos a tener como resultado un ferróníquel oxidado más la escoria de oxidación compuesta principalmente de óxidos y los gases que son generados en esta etapa.

### 3.1.2 Etapa de Desulfuración modelo previo

Como se describió anteriormente para desulfurar el baño de ferróníquel se debe preparar el baño con el fin de evitar la reversión de la reacción de desulfuración debido a la reacción del CaS (Sulfuro de Calcio) con el oxígeno que libera el CaO, para ello se debe tener el baño completamente desoxidado, dicha desoxidación se realiza con Ferrosilicio, además de tener un exceso de aluminio para que dicho reaccione con el oxígeno proveniente del CaO. La temperatura no debe ser menor de 1600°C para lo cual se hace calentamiento con los electrodos del horno cuchara y con la técnica de aluminotermia anteriormente explicada. La figura 10 muestra dentro del diagrama de flujo del modelo previo la simulación y representación de esta etapa:



**Figura 10.** Representación etapa de desulfuración modelo previo

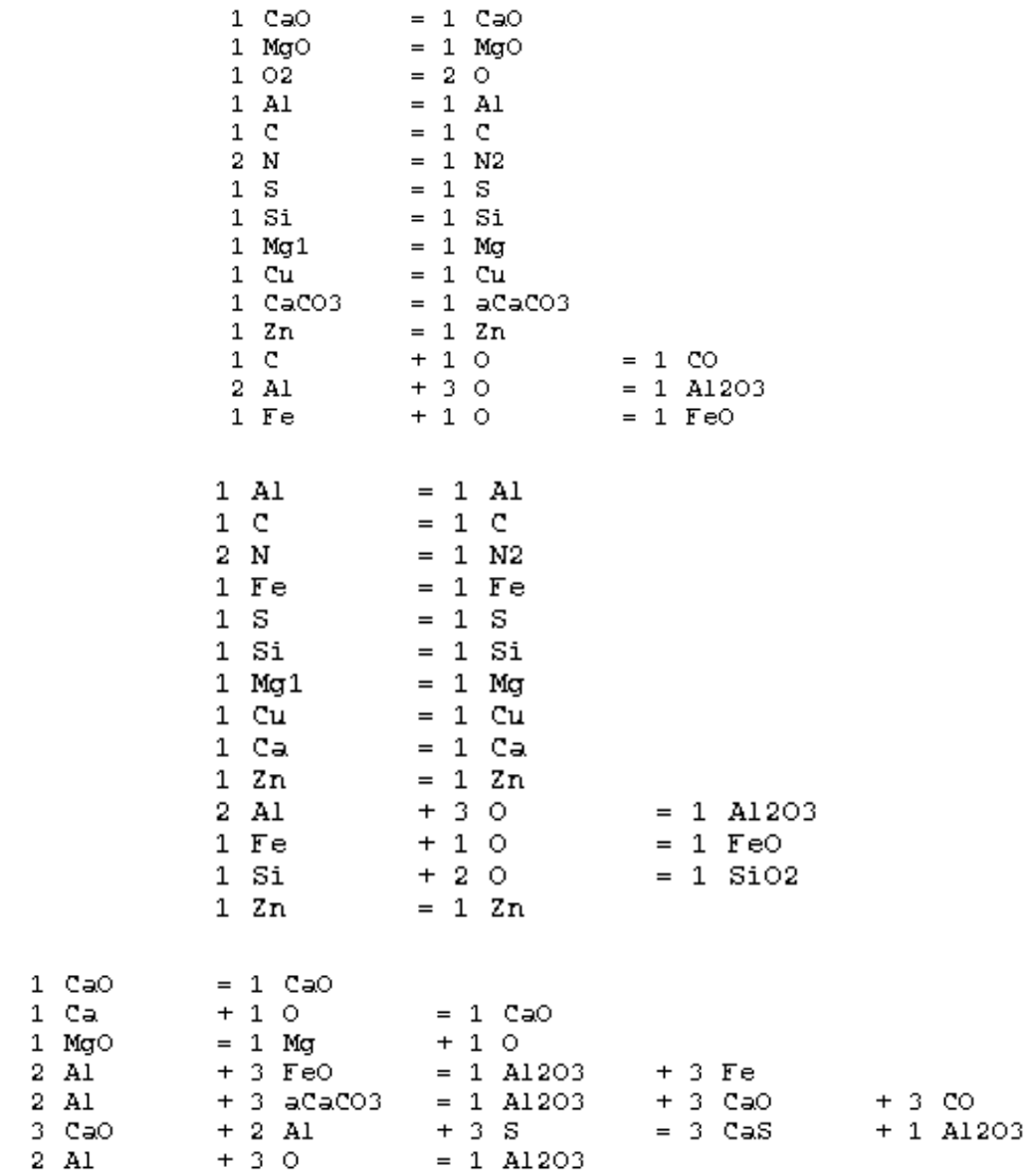
Como se observa en la figura 9 se hace una división de la etapa de desulfuración en dos sub etapas donde la primera de ellas hace referencia a la desoxidación del metal y la segunda a la desulfuración propiamente dicha.

La descripción de las corrientes se muestra en la tabla 2.

<b>Numero Corriente</b>	<b>Descripción</b>
<b>7</b>	<b>Ferroníquel Oxidado</b>
<b>10</b>	<b>Ferrosilicio</b>
<b>11</b>	<b>Ferroníquel desoxidado + Escoria</b>
<b>13</b>	<b>Gases Producidos</b>
<b>14</b>	<b>Aluminio para desulfurar</b>
<b>15</b>	<b>Espato Flúor</b>
<b>16</b>	<b>Mezcla para Desulfurar</b>
<b>17</b>	<b>Aluminio para calentar (Aluminotermia)</b>
<b>18</b>	<b>Gases Producidos</b>
<b>19</b>	<b>Ferroníquel Desulfurado</b>
<b>20</b>	<b>Escoria de desulfuración</b>

**Tabla 2.** Descripción de las corrientes etapa de desulfuración modelo previo

Las reacciones que ocurren en estas etapas son descritas en la figura 11.

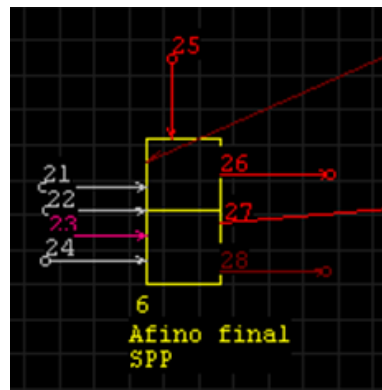


**Figura 11.** Reacciones en la etapa de desulfuración modelo previo

### 3.1.3 Etapa de Afino final modelo previo

En esta etapa básicamente se simula el ajuste de algunos de los elementos presentes. Para ello se da la inyección de Ferrosilicio y calcio Silicio para aumentar el porcentaje de silicio en el baño para con ello favorecer el flujo en la etapa de granulación del metal y disminuir el porcentaje de azufre aun más, por último se realiza la inyección de oxígeno para lograr disolver alguna cantidad de este gas en el baño, ya que con ello se mejoran las características de flujo del mismo.

En el flowsheet encontrado esta etapa se representa como lo muestra la figura 12.



**Figura 12.** Representación etapa de afino final modelo previo

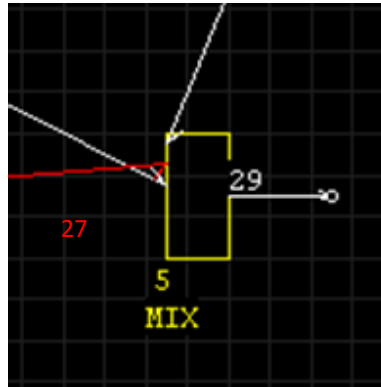
La descripción de las corrientes está representada en la tabla 3.

Número Corriente	Descripción
20	Ferróníquel Desulfurado
21	Oxígeno
22	Ferrosilicio
23	Calcio silicio
24	Corriente Vacía Extra
25	Gases Generados
26	Corriente Vacía Extra
27	Corriente Vacía Extra
28	Ferróníquel Refinado + Escoria de Afino Final

**Tabla 3.** Descripción de las corrientes etapa de afino final modelo previo

#### 3.1.4 Etapa de Escoriado modelo previo

En esta etapa se simula la unión de las corrientes de escoria para formar una sola corriente mediante la implementación de MIX (*Stream Mixer*) como unidad de operación, la figura 13 muestra en el “Flowsheet” la representación de esta etapa:



**Figura 13.** Etapa de Escoriado modelo previo

La descripción de las corrientes está representada en la tabla 4.

Número Corriente	Descripción
9	Escoria de Oxidación
19	Escoria de Desulfuración
27	Escoria de Afino final
29	Escoria total

**Tabla 4.** Descripción de las corrientes etapa de escoriado modelo previo

### 3.2 CURVAS DE REFINACION PARA EL MODELO PREVIO

Las curvas de refinación hacen referencia a la variación del porcentaje de los elementos presentes en el ferróníquel a medida que se realiza el proceso de refinación del ferróníquel, la unidad de negocios de refinería de Cerro Matoso SA para coladas refinadas mediante el procedimiento de una escoria realiza

tres tomas de muestras para ser analizadas en el laboratorio, en la tabla 5 se detalla mas el tipo de muestra a analizar:

<b>Nombre Muestra</b>	<b>Descripción</b>
<b>FP-1</b>	<b>Muestra tomada del metal crudo proveniente de los hornos eléctricos de Fusión.</b>
<b>FR-2</b>	<b>Muestra tomada del metal luego de la etapa de Desulfuración.</b>
<b>FS-3</b>	<b>Muestra tomada del metal luego de la etapa de afinó final.</b>

**Tabla 5.** Tipos de muestras tomadas en el proceso de refinación de ferróníquel

Por requerimientos de la empresa se analizara la variación de los siguientes elementos:

- Silicio
- Fósforo
- Azufre
- Aluminio

### 3.2.1 Variación del Silicio modelo previo



Figura 14. Variación del silicio modelo previo

### 3.2.2 Variación del Fósforo modelo previo

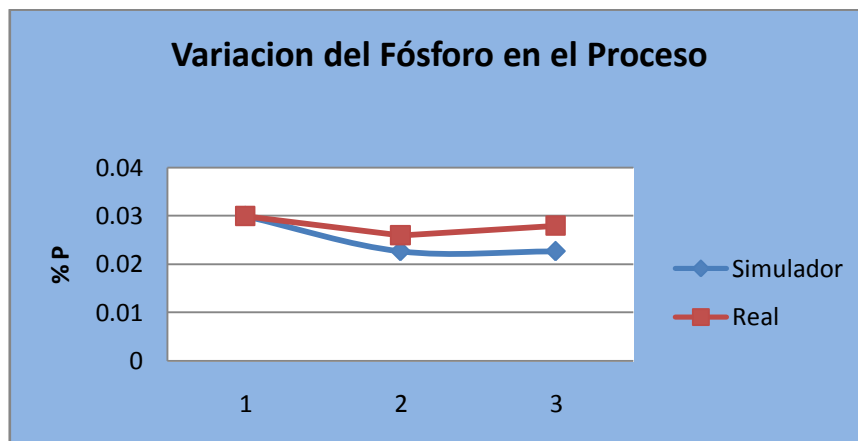


Figura 15. Variación del Fósforo modelo previo

### 3.2.3 Variación del Azufre modelo previo

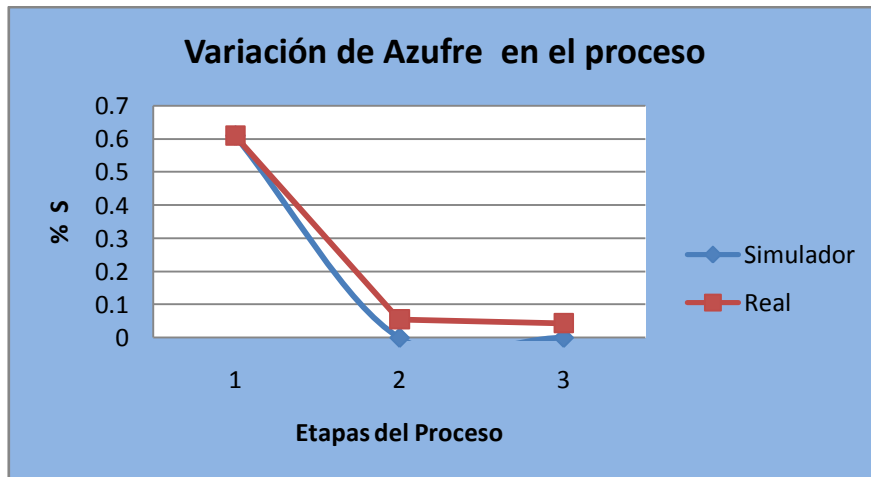


Figura 16. Variación del Azufre modelo previo

### 3.2.4 Variación del Aluminio modelo previo

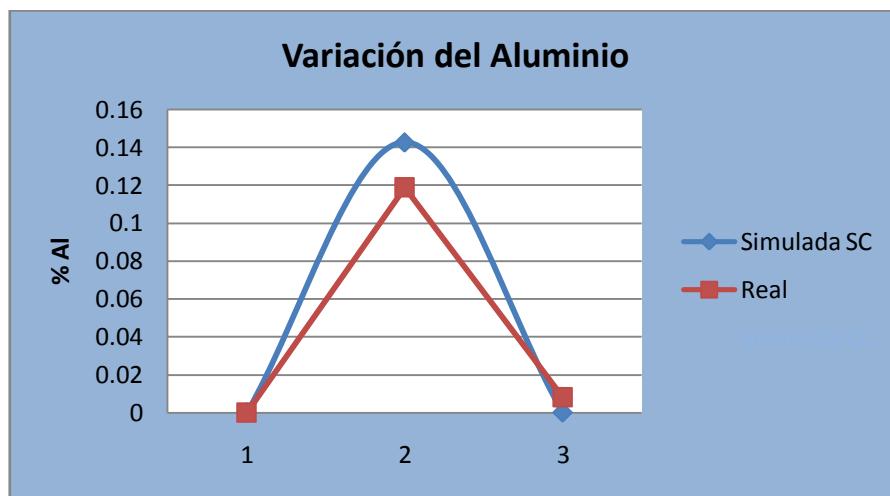


Figura 17. Variación del aluminio modelo previo

## 4. AJUSTE DEL DIAGRAMA DE FLUJO “FLOWSHEET” Y DE LAS CURVAS DE REFINACION MEDIANTE CONTROLADORES FEEDBACK

### 4.1 AJUSTE DEL DIAGRAMA DE FLUJO

Debido a que el diagrama de flujo de procesos encontrado no brindaba claridad secuencial acerca de la marcha normal del proceso de refinación, se vio la necesidad de ajustarlo para con ello proporcionarle a aquel personal que quiera trabajar con el modelo un fácil entendimiento en relación a la secuencialidad del proceso.

#### 4.1.2 Cambio de las unidades de operación

Una de las partes fundamentales de un flowsheet es que se deben establecer las operaciones unitarias (Equipos) más parecidas posibles a las de la realidad del proceso, es por ello que establecer Phase Splitters (SPP) para simular el horno cuchara no es la mejor decisión aun cuando METSIM en el módulo de pirometalurgia nos proporciona tal equipo, es por ello que se procedió a establecer como unidad de operación principal la cuchara (*Ladle*), la figura 18 muestra el esquema de la cuchara y los datos principales a ser ingresados para realizar sobre ella el correspondiente balance de masa.

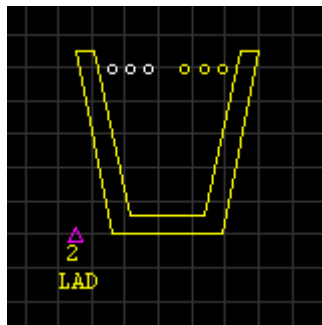
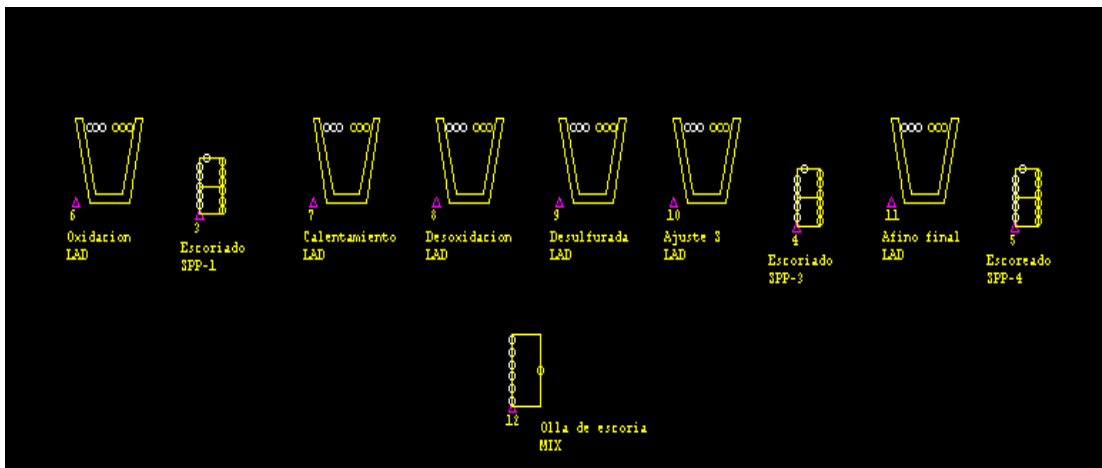


Figura 18. Ladle (Horno Cuchara)

Como se observa esta unidad de operación nos proporciona 6 entradas (*Círculos Blancos*) y tres salidas, las cuales son: la corriente de Metal Fundido y escoria generada en el proceso, la corriente de salida de gases generados, y por último la corriente de encostramiento (*Skulls*) de metal dentro del horno, es necesario el establecimiento de esta última debido a que se trabajara con una secuencialidad de cucharas. Para el propósito del balance de masa, no es necesario el ingreso de más datos que el correspondiente al establecimiento de las reacciones químicas dentro de la cuchara por cada etapa del proceso de refinación.

#### 4.1.3 Establecimiento de la secuencialidad del proceso

Debido a que el flowsheet existente carecía de una secuencialidad o un orden que correspondiera de forma clara a la realidad del proceso, se propuso y realizó el orden de ejecución de proceso ilustrado en la figura 19:



**Figura 19.** Secuencialidad del proceso establecida

Se observa que la primera etapa hace referencia a la etapa de oxidación, seguido de un escoriado, aprovechando para este propósito un Phase Splitter (SPP) debido a que esta es la operación unitaria adecuada para separar fases, en este caso la fase escoria de oxidación de la fase metálica para que así el metal entre a la siguiente etapa sin cantidad apreciable de escoria. La etapa de desulfuración se dividió en 4 sub etapas que se explicaran a continuación:

- **Calentamiento:** Es conocido el carácter endotérmico de la reacción de desulfuración, es por ello que el baño de metal fundido debe venir con determinada temperatura para que dicha reacción se vea favorecida (*no menor a 1600°C*). Por ello se hizo primero la subdivisión ya que por el orden del proceso esta sub etapa es la primera en la etapa de desulfuración y es aquí donde se realiza la inyección de aluminio y de oxígeno, luego se procede al respectivo calentamiento con los electrodos, que para propósitos del balance de masa no tiene relevancia. Hay que tener presente que existe la formación de una escoria primaria.
- **Desoxidación:** En esta etapa el metal llega oxidado, gracias a la etapa de oxidación propiamente dicha y debido al proceso de aluminotermia. Por orden secuencial del proceso y por requerimientos del sistema en esta etapa se simula la desoxidación del baño mediante la adición de Ferrosilicio así como la adición del aluminio necesario para desulfurar, es decir aquella cantidad de aluminio necesario para que reaccione con el oxígeno que libera el CaO en el momento de la desulfuración y de esta forma se impida la reversión de

dicha reacción. Al igual que en la sub etapa anterior existe la formación de una escoria que se va a sumar en cantidad a la producida en la sub etapa anterior.

- **Desulfurada:** En esta sub etapa se simula la desulfuración propiamente dicha, donde el CaO reacciona con el azufre y lo elimina mediante la formación de CaS, para llevar el porcentaje de azufre a niveles muy bajos. También existe la formación de una escoria en cantidad mayor que las dos anteriores.
- **Ajuste de Azufre:** Debido a que en muchas ocasiones al desulfurar con CaO no se alcanza a llegar al valor establecido de azufre en el baño metálico, es necesario adicionar calcio silicio para que sea este el que lleve los niveles de azufre a los establecidos para la venta de esta ferroaleación. Al igual que en las etapas anteriores se da la formación de una escoria.

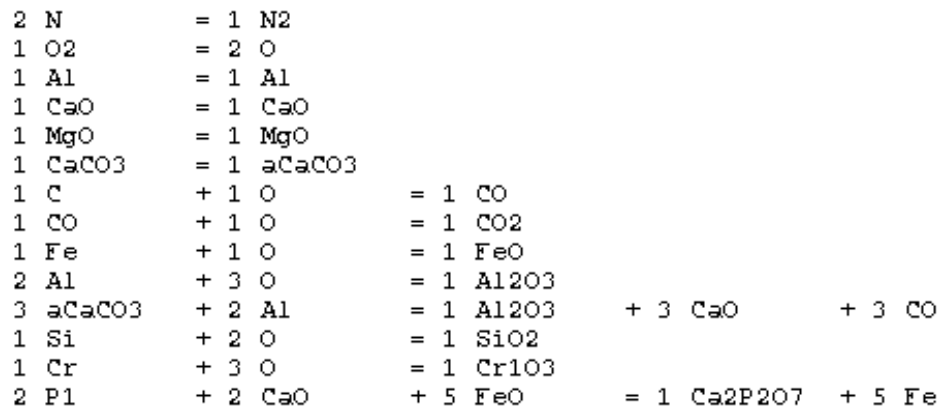
Luego de la etapa de desulfuración se procede a realizar el correspondiente escoriado, que al igual que en la etapa de oxidación se realizó mediante el empleo de un SPP como unidad de operación.

Por último se simuló la etapa de afino final, donde se realizan los ajustes anteriormente descritos. Evidentemente luego de esta etapa también existe la formación de una escoria, la cual es eliminada utilizando un SPP. Luego todas las escorias son reclamadas por la olla de escoria la cual es simulada mediante la implementación de un Stream Mixer (MIX).

#### 4.1.4 Reacciones y establecimiento de factores para las unidades de operación establecidas

Para cada una de las etapas se establecieron las siguientes reacciones que son las mismas del modelo anterior y los factores de separación para los SPP:

##### 4.1.4.1 Etapa de Oxidación



**Figura 20.** Reacciones en la simulación de la etapa de oxidación

Para propósitos del balance de masa únicamente es necesario el establecimiento de las reacciones, tomando la fracción de encostramiento como cero, debido a que no se tienen una cuantificación del metal encostrado en el refractario de la cuchara, al igual que en las demás etapas en las distintas cucharas.

#### 4.1.4.2 Etapa de Desulfuración

Las tablas 6 y 7 nos detallan las reacciones establecidas para cada sub etapa de la desulfuración

Sub Etapa	Reacciones
<b>Calentamiento</b>	$  \begin{array}{l}  1 \text{ CaO} \quad = 1 \text{ CaO} \\  1 \text{ MgO} \quad = 1 \text{ MgO} \\  1 \text{ O}_2 \quad = 2 \text{ O} \\  1 \text{ Al} \quad = 1 \text{ Al} \\  1 \text{ C} \quad = 1 \text{ C} \\  2 \text{ N} \quad = 1 \text{ N}_2 \\  1 \text{ S} \quad = 1 \text{ S} \\  1 \text{ Si} \quad = 1 \text{ Si} \\  1 \text{ Mg} \quad = 1 \text{ Mg} \\  1 \text{ Cu} \quad = 1 \text{ Cu} \\  1 \text{ CaCO}_3 \quad = 1 \text{ CaCO}_3 \\  1 \text{ Zn} \quad = 1 \text{ Zn} \\  1 \text{ C} \quad + 1 \text{ O} \quad = 1 \text{ CO} \\  2 \text{ Al} \quad + 3 \text{ O} \quad = 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 \\  1 \text{ Fe} \quad + 1 \text{ O} \quad = 1 \text{ FeO}  \end{array}  $
<b>Desoxidación</b>	<hr/> $  \begin{array}{l}  1 \text{ Al} \quad = 1 \text{ Al} \\  1 \text{ C} \quad = 1 \text{ C} \\  2 \text{ N} \quad = 1 \text{ N}_2 \\  1 \text{ Fe} \quad = 1 \text{ Fe} \\  1 \text{ S} \quad = 1 \text{ S} \\  1 \text{ Si} \quad = 1 \text{ Si} \\  1 \text{ Mg} \quad = 1 \text{ Mg} \\  1 \text{ Cu} \quad = 1 \text{ Cu} \\  1 \text{ Ca} \quad = 1 \text{ Ca} \\  1 \text{ Zn} \quad = 1 \text{ Zn} \\  2 \text{ Al} \quad + 3 \text{ O} \quad = 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 \\  1 \text{ Fe} \quad + 1 \text{ O} \quad = 1 \text{ FeO} \\  1 \text{ Si} \quad + 2 \text{ O} \quad = 1 \text{ SiO}_2 \\  1 \text{ Zn} \quad = 1 \text{ Zn}  \end{array}  $

**Tabla 6.** Reacciones para las sub etapas de Calentamiento y Desoxidación

Sub Etapa	Reacciones
Desulfurada	$  \begin{array}{l}  1 \text{ CaO} \quad = 1 \text{ CaO} \\  1 \text{ Ca} \quad + 1 \text{ O} \quad = 1 \text{ CaO} \\  1 \text{ MgO} \quad = 1 \text{ Mg} \quad + 1 \text{ O} \\  2 \text{ Al} \quad + 3 \text{ FeO} \quad = 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 \quad + 3 \text{ Fe} \\  2 \text{ Al} \quad + 3 \text{ CaCO}_3 \quad = 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 \quad + 3 \text{ CaO} \quad + 3 \text{ CO} \\  3 \text{ CaO} \quad + 2 \text{ Al} \quad + 3 \text{ S} \quad = 3 \text{ CaS} \quad + 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 \\  2 \text{ Al} \quad + 3 \text{ O} \quad = 1 \text{ Al}_2\text{O}_3  \end{array}  $
Ajuste de Azufre	$  \begin{array}{l}  1 \text{ Al} \quad = 1 \text{ Al} \\  1 \text{ C} \quad = 1 \text{ C} \\  1 \text{ Ca} \quad = 1 \text{ Ca} \\  1 \text{ Fe} \quad = 1 \text{ Fe} \\  2 \text{ N} \quad = 1 \text{ N}_2 \\  1 \text{ S} \quad = 1 \text{ S} \\  1 \text{ Si} \quad = 1 \text{ Si} \\  1 \text{ Ca} \quad + 1 \text{ S} \quad = 1 \text{ CaS}  \end{array}  $

Tabla 7. Reacciones para las sub etapas de Desulfurada y ajuste de azufre.

#### 4.1.4.3 Etapa de Afino Final

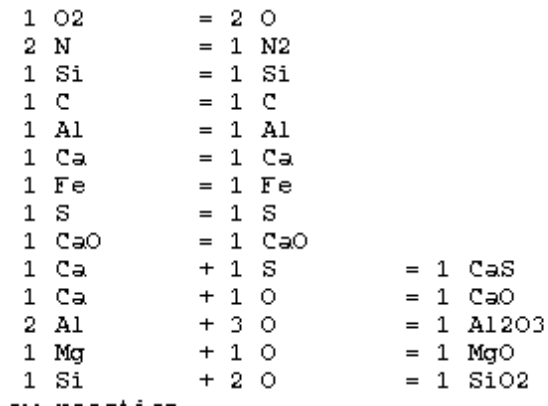
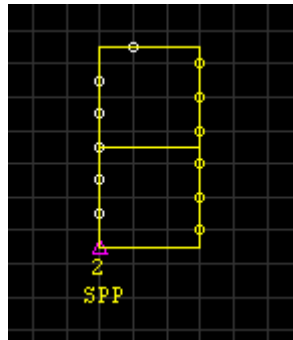


Figura 21. Reacciones en la simulación de la etapa de afino final.

#### 4.1.4.4 Etapas de Escoriado

Como se ha venido mencionando las etapas de escoriado son etapas físicas de separación de la fase escoria de la fase metálica. Para simular este proceso METSIM permite dentro de cada SPP o Splitter Phase, el uso de los *Split Factors* o Factores de separación. La figura 22 muestra el SPP:



**Figura 22.** SPP Splitter Phase (SPP)

El establecimiento de los factores de separación se realizó de la siguiente forma para los tres escoriados (*Oxidación, desulfuración y afino final*) Figura 23.

	OS2	OS3	OS4	OS5	OS6	
FF	0	0	0	0	0	SI split
	0	0	0	0	0	SO split
	0	0	0	0	0	LI split
	0	0	0	0	0	LO split
	1	0	0	0	0	M1 split
	0	0	0	0	0	M2 split
	0	0	0	0	0	M3 split
	0	1	0	0	0	GC split

**Figura 23.** Factores de separación para los SPP

Donde se aprecia que se estableció el 100 por ciento de separación para la fase de metal fundido (M1) en la corriente de salida 2 (OS2) para esta unidad de operación. Es decir que con esta parametrización de los factores de separación no existirá cualquier cantidad de escoria en la corriente de metal fundido

#### 4.1.4.5 Olla de Escoria

Como la olla de escoria no es otra cosa que la sumatoria de los flujos de las escorias de oxidación desulfuración y afino final, esta se simuló mediante la implementación de un *Stream Mixer*, cuya función es la unión de dichas corrientes para producir una sola.

#### 4.1.5 Inserción de las corrientes en el Flowsheet

En base a la inyección de reactivos por cada etapa de refinación y al producto de las mismas, se establecieron las corrientes para con ello unir las operaciones unitarias y terminar el ajuste del “flowsheet”. La figura 24 muestra el flowsheet completo:

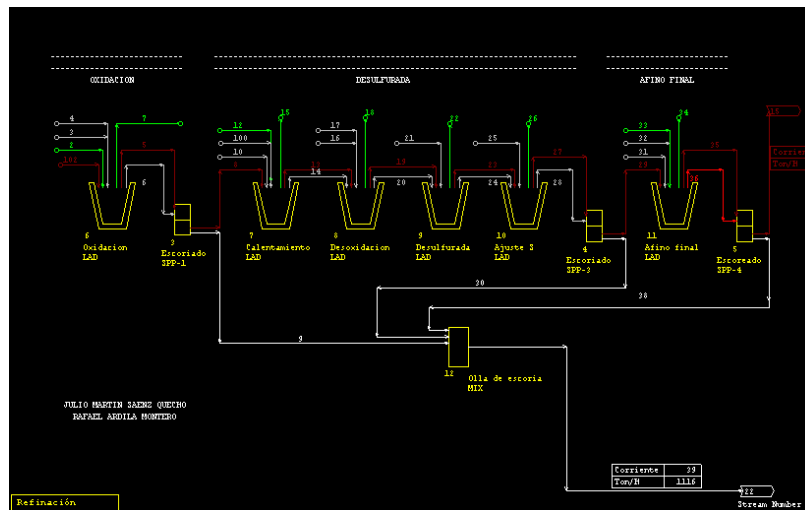


Figura 24. Flowsheet Completo del modelo de Refinación de Ferroníquel

A continuación las siguientes tablas, describen cada corriente por etapa de proceso:

#### 4.1.5.1 Corrientes en la Etapa de Oxidación

Número Corriente	Descripción
102	Ferróníquel crudo
2	Oxígeno para Oxidación
3	Mezcla sintética para desulfurar
4	Dolomita
5	Metal Oxidado + Escoria
6	Encostramiento Oxidación
7	Gases producidos

**Tabla 8.** Corrientes en la etapa de Oxidación

#### 4.1.5.2 Corrientes en la etapa de escoriado de oxidación

Número Corriente	Descripción
5	Ferróníquel oxidado + escoria de oxidación
6	Encostramiento Oxidación
8	Ferróníquel Oxidado
9	Escoria de Oxidación

**Tabla 9.** Corrientes en la etapa de escoriado de oxidación

#### 4.1.5.3 Corrientes en la etapa de Desulfuración

<b>Numero Corriente</b>	<b>Sub etapa</b>	<b>Descripción</b>
8	Calentamiento	Ferróníquel Oxidado
10	Calentamiento	Aluminio para Calentamiento Químico
100	Calentamiento	Mezcla sintética para desulfurar
12	Calentamiento	Oxígeno para oxidar el aluminio
13	Calentamiento	Ferróníquel Oxidado ( $T \geq 1600$ )
14	Calentamiento	Encostramiento Calentamiento
15	Calentamiento	Gases producidos

**Tabla 10.** Corrientes en la etapa de Desulfuración Sub etapa de calentamiento

<b>Número Corriente</b>	<b>Sub etapa</b>	<b>Descripción</b>
<b>13</b>	<b>Desoxidación</b>	<b>Ferróníquel Oxidado (T&gt;=1600)</b>
<b>14</b>	<b>Desoxidación</b>	<b>Encostramiento Calentamiento</b>
<b>16</b>	<b>Desoxidación</b>	<b>Ferrosilicio para desoxidar</b>
<b>17</b>	<b>Desoxidación</b>	<b>Aluminio para desulfurar</b>
<b>18</b>	<b>Desoxidación</b>	<b>Gases Generados</b>
<b>19</b>	<b>Desoxidación</b>	<b>Encostramiento Desoxidación</b>
<b>20</b>	<b>Desoxidación</b>	<b>Ferróníquel desoxidado + Escoria</b>

**Tabla 11.** Corrientes en la etapa de Desulfuración Sub etapa de Desoxidación.

<b>Número Corriente</b>	<b>Descripción</b>
<b>19</b>	<b>Encostramiento Desoxidación</b>
<b>20</b>	<b>Ferróníquel desoxidado + Escoria</b>
<b>21</b>	<b>Espato Flúor</b>
<b>22</b>	<b>Gases Generados</b>
<b>23</b>	<b>Ferróníquel desulfurado + Escoria</b>
<b>24</b>	<b>Encostramiento Desulfuración</b>

**Tabla 12.** Corrientes en la etapa de Desulfuración Sub etapa de Desulfurada

<b>Número Corriente</b>	<b>Descripción</b>
<b>23</b>	<b>Ferróníquel desulfurado + Escoria</b>
<b>24</b>	<b>Encostramiento Desulfuración</b>
<b>25</b>	<b>Calcio Silicio ajuste de azufre</b>
<b>26</b>	<b>Gases Generados</b>
<b>27</b>	<b>Ferróníquel desulfurado a especificación + Escoria</b>
<b>28</b>	<b>Encostramiento ajuste de azufre</b>

**Tabla 13.** Corrientes en la etapa de Desulfuración Sub etapa de ajuste de azufre.

#### 4.1.5.4 Corrientes en la etapa de escoriado de desulfuración

Número Corriente	Descripción
27	Ferróníquel desulfurado a especificación + Escoria
28	Encostramiento ajuste de azufre
29	Ferróníquel desulfurado a especificación
30	Escoria de Desulfuración

**Tabla 14.** Corrientes en la etapa de escoriado de desulfuración

#### 4.1.5.5 Corrientes en la Etapa de afino final

Número Corriente	Descripción
29	Ferróníquel desulfurado a especificación
31	Calcio Silicio enjuague final
32	Ferrosilicio enjuague final
33	Oxígeno soplo final
34	Gases Generados
35	Ferróníquel refinado + Escoria
36	Encostramiento Afino final

**Tabla 15.** Corrientes en la etapa de escoriado de afino final.

#### 4.1.5.6 Corrientes en la Etapa de escoriado de Afino final

---

Número Corriente	Descripción
35	Ferroníquel refinado + Escoria
36	Encostramiento Afino final
37	Ferroníquel Refinado
38	Escoria Afino Final

---

**Tabla 16.** Corrientes en la etapa de escoriado de Afino final

#### 4.1.5.7 Corrientes de la Olla de Escoria (*Stream Mixer*)

---

Número Corriente	Descripción
9	Escoria de Oxidación
30	Escoria de Desulfuración
38	Escoria Afino Final
39	Escoria total del proceso de Refinación

---

**Tabla 17.** Corrientes de la olla de escoria.

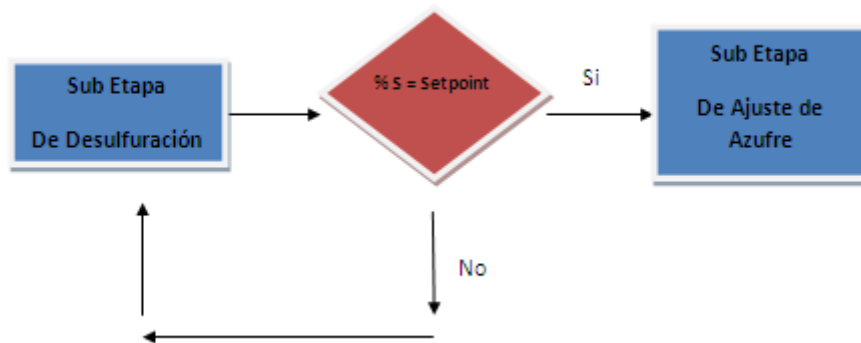
## **4.2 AJUSTE DE LAS CURVAS DE REFINACIÓN MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES FEEDBACK**

Una de las ventajas de la simulación de procesos es el ajuste del mismo mediante la implementación de controladores los cuales ejecutan cálculos iterativos en base a algunas restricciones ingresadas por el usuario. Este es el caso de los controladores Feedback, los cuales responden a alguna perturbación del sistema y que fueron empleados para ajustar las curvas de refinación.

### **4.2.1 Ajuste curva de Refinación para el azufre**

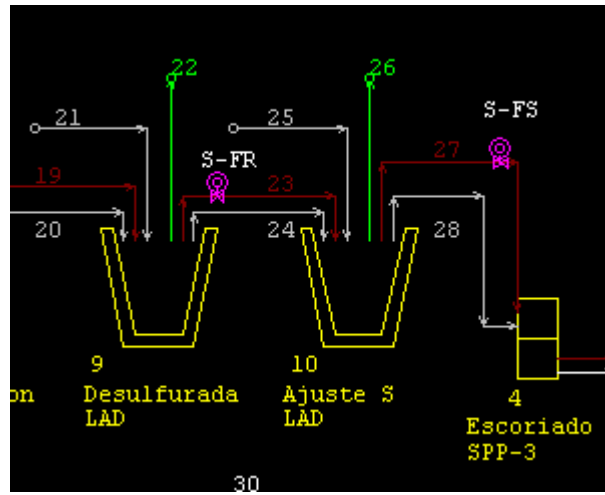
Teniendo disponible el dato de laboratorio correspondiente al porcentaje de azufre en el baño de ferroníquel fundido luego de la desulfuración con mezcla sintética (85% CaO-15%MgO), dicho porcentaje se tomo como el “Setpoint” (porcentaje real de azufre en la etapa de desulfuración) del controlador, el cual con este valor calculó el porcentaje de CaO que efectivamente está reaccionando para eliminar el azufre. Debido a que predicciones estequiometricas ideales, la cantidad de mezcla sintética para desulfurar es suficiente para eliminar completamente este porcentaje de azufre. Esto se ve evidenciado en la curva simulada de desulfuración, ya que el porcentaje de dicho elemento en el segundo muestreo (*Simulado*) es de cero.

Para obtener resultados, se tomaron los mismos datos con los que se construyeron las gráficas del modelo anterior correspondientes al balance global del mes de noviembre del FY-09 (*Año financiero- segundo semestre de 2008*). El esquema general de actuación de dicho controlador puede apreciarse en la figura 25.

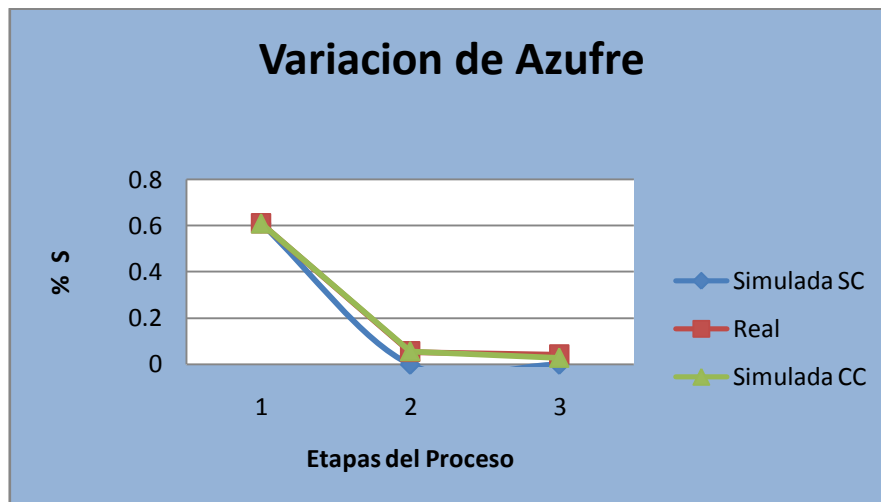


**Figura 25.** Mecanismo de acción del controlador Feedback

Como se observa el controlador indaga acerca del porcentaje de azufre en el baño de ferróniquel y lo compara con el Setpoint establecido (*Setpoint: porcentaje real de azufre en el ferróniquel luego de desulfurar*) si este valor es igual, el simulador inmediatamente pasará a ejecutar la siguiente operación que en este caso es la de ajuste de azufre con calcio silicio, en el caso de no ser igual vuelve a calcular (ajustar) el porcentaje de azufre real trayendo como consecuencia el ajuste en este caso de la fracción de CaO que realmente está eliminando al azufre. En términos de simulación de procesos el controlador realimenta la información para así llegar al porcentaje del elemento que el usuario establece. En la figura 27 se muestra la variación de la curva de refinación para el azufre comparando, la real, con la simulada con controladores y sin controladores (*Modelo previo al desarrollado en este trabajo*). El mismo procedimiento se siguió para ajustar el porcentaje de azufre en el tercer análisis. De lo anterior veamos cómo están representados estos controladores en el flowsheet de METSIM Figura 26.



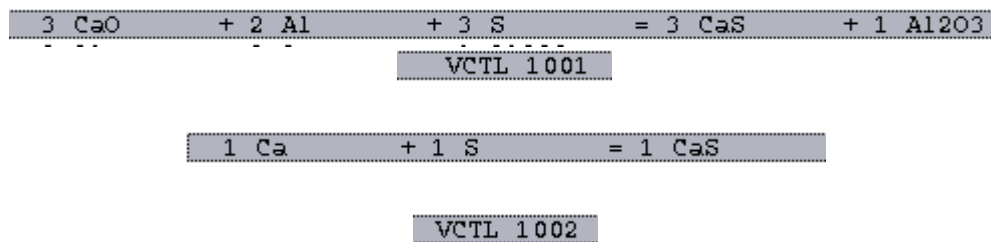
**Figura 26.** Controladores Feedback en la etapa de desulfuración



**Figura 27.** Comparación de curvas de refinación para el azufre Real – simulada con control- Simulada sin control

Como se observa en la figura 22 estos controladores son representados como válvulas en el “flowsheet” y estos deben colocarse en la parte superior de la corriente de interés, en este caso las corrientes de ferroníquel fundido.

Es lógico que dicho control deba ligarse a la reacción de desulfuración como lo muestra la figura 28.



**Figura 28.** Reacciones controladas

Se observa cómo se ligó el controlador 1001 y 1002 a la reacción global de desulfuración con CaO y CaSi.

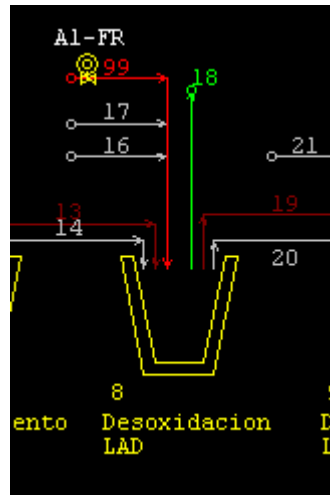
De esta forma se observa cómo se ajusta la curva simulada con controladores a la real, trayendo como principal beneficio el conocimiento de la fracción de CaO que realmente reacciona para llevar el porcentaje de azufre al real. Retomando datos del simulador se observó que en promedio para el mes de noviembre de 2008 reaccionó el 24% de CaO y el 44 % de CaSi, resultados muy importantes ya que con ellos se obtuvo la conclusión de que el proceso de desulfuración no es tan eficiente debido a consideraciones cinéticas estrechamente ligadas a la agitación del metal con nitrógeno, es por ello que la empresa estudia la posibilidad de rediseñar

la etapa de desulfuración para con ello aprovechar el 100 por ciento de los reactivos para desulfurar.

#### **4.2.2 Ajuste curva de Refinación para el Aluminio**

Observando la curva de variación de azufre se observó como el porcentaje de este elemento en algunas simulaciones queda por encima del valor real en el segundo análisis de laboratorio. Para ajustar dicha forma se procedió de la siguiente forma.

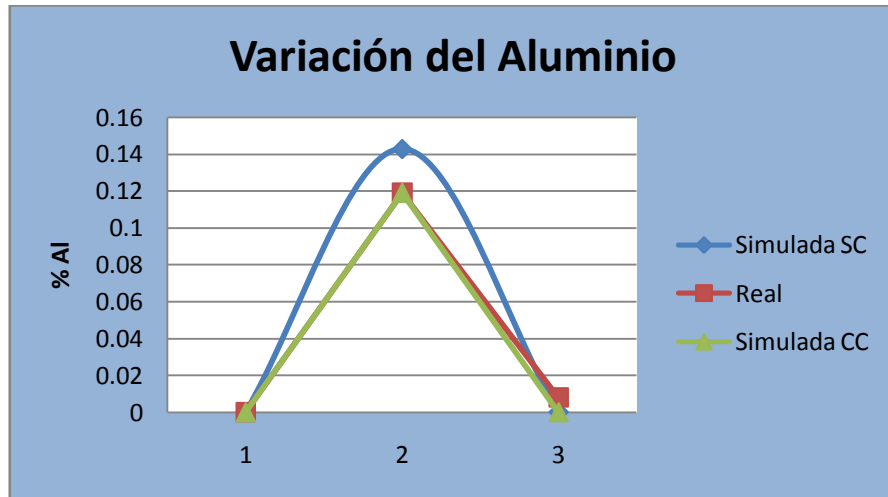
Revisando la teoría de la refinación de hierro en horno de cuchara y bajo esas circunstancias se sabe que en el momento de la agitación del baño metálico, existe una absorción de oxígeno del ambiente por el baño de metal fundido, dicho oxígeno va a oxidar el aluminio debido a la gran afinidad de este elemento por este elemento, y se estudió la posibilidad de que esta era una de las causas de la reducción del porcentaje de aluminio en el ferróníquel, pero hasta el momento el simulador no cuantificaba la cantidad de oxígeno atraído. Fue por ello que se vio la necesidad de la inserción de una nueva corriente de oxígeno, la cual será ajustada mediante la implementación de un controlador Feedback llevando el Setpoint de este al valor real correspondiente al porcentaje de aluminio. Esto puede apreciarse en la figura 29.



**Figura 29.** Nueva corriente de cuantificación de oxígeno (*Corriente 99*)

Como en este caso el controlador ajusta el flujo de la corriente no es necesario ligar dicho controlador a ninguna reacción. Se eligió poner la corriente en la sub etapa de desoxidación por comodidad, ya que dicha corriente puede establecerse en cualquiera de las sub etapas de la desulfuración.

En base a los cambios anteriormente dichos se observa cómo se ajusta la curva real a la simulada con control, como lo muestra figura 30.



**Figura 30.** Comparación de curvas de refinación para el Aluminio Real – simulada con control- Simulada sin control

## **5. CREACION DE LA INTERFAZ DE INTERCAMBIO DINAMICO DE DATOS ENTRE MICROSOFT EXCEL Y METSIM PARA EL FACIL INGRESO Y ANALISIS DE DATOS**

Debido a que ingresar datos al simulador y analizar los datos generados tomaba mucho tiempo, se construyó un vínculo entre el Excel y METSIM, aprovechando el mecanismo de intercambio dinámico de datos generado entre estos dos programas en base a la creación de variables vectoriales para la importación y escalares para la exportación de datos desde METSIM hacia Excel.

### **5.1 VARIABLES CREADAS PARA LA IMPORTACION DE DATOS**

Para importar datos METSIM nos da la opción de hacerlo mediante la creación de variables escalares y vectoriales, para el caso de este trabajo se crearon 15 vectores en METSIM y la misma cantidad en Excel.

#### **5.1.1 Ubicación de los valores importados en las corrientes**

Uno de los principales problemas que se tenía al momento de la importación era la ubicación de dichos valores en las corrientes, para lo cual se intentó poner controladores de flujo (*Flow Rate Controls*) para con ello igualar el Setpoint de estos a la componente del vector correspondiente al flujo de la corriente. Esta acción inicialmente mostró una respuesta satisfactoria para esta tarea, pero el problema se centraba en el ingreso de la composición química de cada reactivo, ya que mediante la implementación de dichos controladores imposibilitaba esta labor. Por otro lado se sabe que para que un flowsheet trabaje en cortos tiempos de ejecución se debe minimizar el uso de controladores, descartando de cualquier forma la implementación de estos.

Para solucionar este problema se recurrió a la programación de una función en APL encargada de ubicar estos valores, dicha función se detalla a continuación:

#### 5.1.1.1 Función APL de ubicación de Valores importados desde Excel

- **Nombre:** *loc S*
- **Rutina de Rebote APL:** *xc*
- **Mecanismo de Ubicación:** Multiplicación del flujo total por el porcentaje del elemento estableciendo con ello flujos por componentes.
- **Matriz de manipulación en METSIM:** STR [IS; CN] la cual fue llenada con los vectores creados.

La programación de la función se muestra detalladamente en la figura 31.

xc+loc S

```
STR[102;46]+(UVFeNiCrudo[1]*UVFeNiCrudo[3])÷100
TEM[102]+UVFeNiCrudo[2]
STR[102;48]+(UVFeNiCrudo[1]*UVFeNiCrudo[4])÷100
STR[102;49]+(UVFeNiCrudo[1]*UVFeNiCrudo[5])÷100
STR[102;44]+(UVFeNiCrudo[1]*UVFeNiCrudo[6])÷100
STR[102;52]+(UVFeNiCrudo[1]*UVFeNiCrudo[7])÷100
STR[102;50]+(UVFeNiCrudo[1]*UVFeNiCrudo[8])÷100
STR[102;45]+(UVFeNiCrudo[1]*UVFeNiCrudo[9])÷100
STR[102;43]+(UVFeNiCrudo[1]*UVFeNiCrudo[10])÷100
STR[102;85]+(UVFeNiCrudo[1]*UVFeNiCrudo[11])÷100
STR[102;87]+(UVFeNiCrudo[1]*UVFeNiCrudo[12])÷100
STR[102;51]+(UVFeNiCrudo[1]*UVFeNiCrudo[13])÷100
STR[2;77]+(UVOxOx[1]*UVOxOx[2])÷100
STR[2;76]+(UVOxOx[1]*UVOxOx[3])÷100

STR[3;2]+(UVMDOx[1]*UVMDOx[4])÷100
STR[3;3]+(UVMDOx[1]*UVMDOx[5])÷100
STR[3;10]+(UVMDOx[1]*UVMDOx[6])÷100
STR[3;12]+(UVMDOx[1]*UVMDOx[7])÷100
STR[3;15]+(UVMDOx[1]*UVMDOx[8])÷100
STR[3;25]+(UVMDOx[1]*UVMDOx[9])÷100
STR[4;6]+(UVDolOx[1]*UVDolOx[2])÷100
STR[4;16]+(UVDolOx[1]*UVDolOx[3])÷100
STR[4;18]+(UVDolOx[1]*UVDolOx[4])÷100
STR[10;1]+(UVALCal[1]*UVALCal[2])÷100
STR[10;3]+(UVALCal[1]*UVALCal[3])÷100
STR[10;18]+(UVALCal[1]*UVALCal[4])÷100
STR[10;23]+(UVALCal[1]*UVALCal[5])÷100
STR[10;24]+(UVALCal[1]*UVALCal[6])÷100
STR[10;26]+(UVALCal[1]*UVALCal[7])÷100
STR[10;84]+(UVALCal[1]*UVALCal[8])÷100
STR[10;86]+(UVALCal[1]*UVALCal[9])÷100

STR[100;6]+(UVMDDS[1]*UVMDDS[2])÷100
STR[100;16]+(UVMDDS[1]*UVMDDS[3])÷100
STR[100;2]+(UVMDDS[1]*UVMDDS[4])÷100
STR[100;3]+(UVMDDS[1]*UVMDDS[5])÷100
STR[100;10]+(UVMDDS[1]*UVMDDS[6])÷100
STR[100;12]+(UVMDDS[1]*UVMDDS[7])÷100
STR[100;80]+(UVMDDS[1]*UVMDDS[8])÷100
STR[100;25]+(UVMDDS[1]*UVMDDS[9])÷100
STR[12;77]+(UVOxCal[1]*UVOxCal[2])÷100
STR[12;76]+(UVOxCal[1]*UVOxCal[3])÷100
STR[16;10]+(UVFeSiDes[1]*UVFeSiDes[2])÷100
STR[16;24]+(UVFeSiDes[1]*UVFeSiDes[3])÷100
STR[16;3]+(UVFeSiDes[1]*UVFeSiDes[4])÷100
STR[16;5]+(UVFeSiDes[1]*UVFeSiDes[5])÷100
STR[16;23]+(UVFeSiDes[1]*UVFeSiDes[5])÷100
STR[17;23]+(UVALDes[1]*UVALDes[2])÷100
STR[17;3]+(UVALDes[1]*UVALDes[3])÷100
```

```

STR[17;18]+(UVA1Des[1]*UVA1Des[4])÷100
STR[17;23]+(UVA1Des[1]*UVA1Des[5])÷100
STR[17;24]+(UVA1Des[1]*UVA1Des[6])÷100
STR[17;26]+(UVA1Des[1]*UVA1Des[7])÷100
STR[17;84]+(UVA1Des[1]*UVA1Des[8])÷100
STR[17;86]+(UVA1Des[1]*UVA1Des[9])÷100
STR[21;6]+(UVEspato[1]*UVEspato[2])÷100
STR[25;51]+(UVCaSiDes[1]*UVCaSiDes[2])÷100
STR[25;24]+(UVCaSiDes[1]*UVCaSiDes[3])÷100
STR[25;1]+(UVCaSiDes[1]*UVCaSiDes[4])÷100
STR[25;23]+(UVCaSiDes[1]*UVCaSiDes[5])÷100
STR[25;101]+(UVCaSiDes[1]*UVCaSiDes[6])÷100
STR[25;181]+(UVCaSiDes[1]*UVCaSiDes[7])÷100
STR[25;31]+(UVCaSiDes[1]*UVCaSiDes[8])÷100
STR[33;77]+(UVOxF[1]*UVOxF[2])÷100
STR[33;76]+(UVOxF[1]*UVOxF[3])÷100
STR[32;10]+(UVFeSiF[1]*UVFeSiF[2])÷100

STR[31;24]+(UVCaSiF[1]*UVCaSiF[3])÷100
STR[31;1]+(UVCaSiF[1]*UVCaSiF[4])÷100
STR[31;23]+(UVCaSiF[1]*UVCaSiF[5])÷100
STR[31;101]+(UVCaSiF[1]*UVCaSiF[6])÷100
STR[31;181]+(UVCaSiF[1]*UVCaSiF[7])÷100
STR[31;31]+(UVCaSiF[1]*UVCaSiF[8])÷100

xc<STR[102;46] , TEM[102] , STR[102;48] , STR[102;49],STR[102;44]

```

**Figura 31.** Programación de la función de ubicación de datos

## 5.2 EXPORTACION DE DATOS

Para la exportación METSIM es un poco más flexible, para lo cual se empearon las funciones estándares del software con las cuales distingue los distintos valores generados.

Para ello se crearon 55 variables en Excel, y se utilizaron las siguientes funciones estándares:

- **VSTR S:** Flujo total de la corriente S.

- **VTEM:** Temperatura de la corriente S.
- **C VEM1 S:** porcentaje del elemento C en la corriente S.

### 5.3 VISTA DE LA INTERFAZ

Se dividió en dos hojas en un libro de Excel, una correspondiente a las entradas (*Inputs*) y otra correspondiente a las salidas (*Outputs*).

#### 5.3.1 Entradas

Nos muestra los flujos requeridos de las corrientes con la respectiva composición química, la figura 32 representa esta parte:

Metal Colado Neto	Oxigeno Oxidación	Dolomita Oxidación	Mezcla Desulfurante
Ton-FeNi Crudo	13292.41	Ton- Oxigeno	18.2
T(°C) FeNi Crudo	1400	%O2	99.5
% Ni	32.0753133	%N2	0.5
% S	0.53978517	MD Oxidacion	%N
% Si	0.02679451	Ton- Mezcla	7.93
% C	0.05301705	%CaO	87.1351654
% P	0.02915733	%MgO	6.36162133
% Co	0.69092052	%Al2O3	0.35404585
%Fe	66.4647942	%C	0.30935293
% Al	0	%Fe	0.21063487
%Cu	0.05801506	%Fe2O3	0.29877287
%Zn	0	LOI	4.01550737
%Cr	0.06220276	%SiO2	1.3148994
			%Zn
			1.1677

FeSi Desoxidacion	CaF2 Desulfurada	FeSi Enjuague Final
Ton Fe Si	35.07	Ton CaF2
%Fe	22.5	%CaO
%Si	76.94	CaSi Desulfurada
%C	0.03	Ton CaSi
%Ca	0.52	%Ca
%S	0.01	%Si
Aluminio Desulfurada	%Al	0.747
Ton-Al	64.77	%S
%Al	96.3199	%Fe
%C	0.0059	%N
%N	0.0094	%C
%S	0	Oxigeno Soplo Final
%Si	0.7754	Ton- Oxigeno
%Mg	0.2483	%O2
%Cu	1.4734	%N2
%Zn	1.1677	%C

**Figura 32.** Representación de los datos a ser ingresados en Excel

Estos datos son tomados por METSIM y empleados para resolver el balance de masa.

### 5.3.2 Salidas

**Resultados de**

FS			FR		
FeNi Crudo	13292.41	TN	FeNi Crudo	13262	TN
Ni	32	%	Ni	32	%
S	0.5397852	%	S	0.055	%
Si	0.0267945	%	Si	0.237740428	%
C	0.053017	%	C	0.035293442	%
Al	0	%	Al	0.237436181	%
P	0.0291573	%	P	0.021896948	%
Co	0.6909205	%	Co	0.691835153	%

Escoria Oxidacion			Escoria Desulfuracion		
Ton	142	TN	Ton	694	TN
% Ca <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	3	%	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25	%
%CaO	41	%	%CaS	22	%
%MgO	23	%	%CaO	53	%
%FeO	33	%			
%SiO <sub>2</sub>	0	%			

FS			Gases Generados en Oxidacion		
FeNi Crudo	13104	TN	Ton gases	25	TN
Ni	32	%	%CO	15	%
S	0.02612788	%	%CO <sub>2</sub>	24	%
Si	0.4765592	%	%N <sub>2</sub>	61	%
C	0.03615759	%			
Al	0	%	Gases generados en Calentamiento		
P	0.02191728	%	Ton gases	1	TN
Co	0.69247769	%	%CO	15	%
			%N <sub>2</sub>	24	%

**Figura 33.** Representación de los Resultados en Excel

Se observa la facilidad con la cual los resultados generados pueden ser leídos directamente en Microsoft Excel.

## **6. ELABORACIÓN DEL TUTORIAL DE METSIM**

Otro de los inconvenientes encontrados era la poca información acerca del manejo del software, por lo cual se decidió escribir un completo tutorial acerca del funcionamiento del software con ejemplos sencillos y escrito completamente en español, para que con el, cualquier personal que lo lea en poco tiempo adquiriera destreza en el manejo del mismo y pueda correr una simulación en corto tiempo

## 7. CONCLUSIONES

- Mediante la realización de este trabajo se demostró como la simulación de procesos puede ayudar en el análisis de la variabilidad de un proceso de una forma sencilla. Para este caso específico se analizó la dispersión de las curvas de refinación para analizar la variación de elementos presentes en el ferroníquel específicamente azufre y el aluminio.
- Se logró con éxito la simulación de la etapa de desulfuración como un conjunto de cuatro sub etapas. Con esto se consiguen menores tiempos de cálculo por parte del simulador y en la misma etapa de desulfuración se implementaron dos controladores los cuales mejoran y aproximan los resultados generados más a la realidad del proceso.
- La curva de variación de azufre fue ajustada mediante la implementación de una estrategia de control basada en el concepto de retroalimentación (Feedback), con ello se observó que tan solo el 24 por ciento del CaO reacciona con el azufre y el 44 por ciento del CaSi reacciona con el mismo elemento, haciendo de la desulfuración una etapa poco eficiente, por lo cual Cerro Matoso SA estudia la posibilidad rediseñar la etapa de desulfuración.
- La curva de variación del aluminio fue ajustada al igual que en el caso del azufre mediante el uso de controladores Feedback con la diferencia de que en este caso se ajustó el flujo de la corriente, observándose que existe determinada cantidad de oxígeno que se disuelve en el baño y oxida el aluminio. dicho oxígeno se supone

proviene del ambiente y este es absorbido cuando el metal está siendo agitado.

- Se llevó a cabo la creación de la interfaz de usuario la cual intercambia datos entre METSIM Y Microsoft Excel y permite reducir el tiempo para ingresar, correr y analizar una simulación.
- El modelo desarrollado y los ajustes establecidos en este trabajo, ya fueron implementados con éxito en el área de refinación de Cerro Matoso SA.

## **8. RECOMENDACIONES**

- Con base en el modelo desarrollado se recomienda complementar los balances teniendo en cuenta la cantidad de metal que se pierde junto con la escoria en el momento del escoriado en cualquiera de las etapas para con ello definir nuevos factores de separación o Split Factors que mejoren aun más la exactitud de los cálculos.
- En este trabajo se deja abierta para Cerro Matoso y para la UIS la posibilidad de realizar más trabajos de simulación de procesos y promover el entendimiento y capacitación en este tema.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- Ruiz, Rafael. Manual de la subfase de refinación. Cerro Matoso S.A., (2007).
- Pérez, Fabio R. y TORRES, Boris. Refinación de ferroníquel curso de capacitación. Ediciones U.P.T.C., (1995)
- Giraldo, Alonso. Desulfuración de metales con base metálica en hierro. Cerro Matoso S.A., (2000)
- Sáenz, Julio M. Oxidar el aluminio para aumentar la temperatura para desulfurar (modelo en simulador METSIM). Cerro Matoso S.A., (2007).
- Cerro Matoso S.A. Fusión y Refinación de hierro y níquel. Apuntes de diplomado, módulo 2: las fases de fusión y refinación. Cerro Matoso S.A., (2007).
- Martínez Sifuentes, Víctor Hugo. Alonso Dávila Pedro. Simulación de procesos en ingeniero química. Valdés editores, ciudad de México (2000).
- Scenna, Nicolás José. Modelado, simulación y optimización de procesos químicos. (1999).

