



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

IMPLANTACION DEL DESPOJO GALVANICO Y LA  
PIROCONVERSION EN LA HIDROMETALURGIA DEL ZINC

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO  
P R E S E N T A  
OCTAVIO VAZQUEZ GOMEZ



MEXICO, D.F.



EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA

2005

m. 347411



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

Presidente Prof. Leopoldo Rodríguez Reyes

Vocal Prof. José Antonio Barrera Godínez

Secretario Prof. Antonio Huerta Cerdán

1er. Suplente Prof. Rosa Elva Rivera Santillán

2do. Suplente Prof. Faustino Juárez Sánchez

Sección de Ingeniería de Procesos Metalúrgicos, cubículo 8, 1er piso, Edificio D, Facultad de Química, U. N. A. M.



---

Dr. José Antonio Barrera Godínez  
Asesor



---

M. en I. Luis Soto Castro  
Supervisor Técnico



---

Octavio Vázquez Gómez  
Sustentante

*Por todo su amor, ayuda, y comprensión a mi madre  
Lux Rosaura Gómez Guerrero y a mi  
hermano Eduardo Vázquez Gómez  
les dedico esta tesis.*

*Agradexco a la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Química por la oportunidad que me dieron de desarrollarme profesionalmente en sus instalaciones a lo largo de este tiempo.*

*Un agradecimiento especial al Dr. José Antonio Barrera Godínez por su apoyo y asesoramiento en este trabajo de tesis.*

*A mi tío Manuel Gómez Guevara por todo su cariño, apoyo y comprensión.*

*A mis amigos incondicionales Txiran, Alex, Fernando y Enrique por su amistad y cariño a lo largo de mi vida, al igual que a la familia Figueroa Hernández por su amistad.*

*A Rosa del Carmen Montesinos Gómez y su familia por su amor, amistad y apoyo durante mis estudios profesionales.*

*A Carlos Soto y sus hermanos por toda su amistad y apoyo.*

*A mis amigos de la Facultad, Edgar, Israel, Arturo, Jesús's y Omar, por su amistad durante la carrera.*

*A mi padre Alberto Vázquez Ríos*

## Resumen

El hierro es una impureza en el proceso hidrometalúrgico del zinc y su presencia en el electrolito impide el electrodeposición sobre los cátodos disminuyendo la eficiencia de corriente durante la electrólisis. En la actualidad, existen procesos que eliminan el hierro a través de la precipitación de compuestos. La jarosita es uno de los principales precipitados que se forman, pero tiene la desventaja de ser tóxico, voluminoso y de no tener ninguna utilidad para la industria, por lo que se almacena o se deposita en los mares. Los daños provocados en el ambiente por la práctica de estas actividades aún no han sido cuantificados, para aminorar estos daños se busca una nueva opción para la eliminación del hierro que sea más amigable con el ambiente y rentable para el proceso. El proceso del despojo galvánico y la piroconversión es una idea innovadora, que propone la formación de la hematita, el cual es útil para la industria siderúrgica, y de ésta manera se podrá sustituir el proceso de formación del precipitado de jarosita. Existen una gran cantidad de resultados experimentales de este proceso, a nivel laboratorio, por lo que ahora se busca la implantación de estos procesos en la industria. Para acoplar el despojo galvánico y la piroconversión al proceso hidrometalúrgico de zinc se propone primeramente el desarrollo de un modelo matemático que permita simular tanto al proceso convencional de extracción de zinc como al modificado con la implantación del despojo galvánico y la piroconversión. Para lograr este objetivo se formularon los balances de materia correspondientes a cada uno de los módulos que constituyen una planta hidrometalúrgica de extracción de zinc. Se simuló el zinc y el hierro como reductores durante el despojo galvánico con la finalidad de conocer su comportamiento y efectos en el proceso. El efecto de otras variables de operación en el despojo galvánico y en el proceso global se simuló y los resultados también se presentan en este trabajo. Así, la viabilidad de la implantación del despojo galvánico y la piroconversión en el proceso hidrometalúrgico del zinc queda esclarecida al mostrarse cuantitativamente los flujos y concentraciones del proceso modificado y su comparación respecto al convencional.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. La problemática del hierro . . . . .	1
1.2. Procesos actuales para combatir la problemática del hierro . . . . .	1
1.3. El despojo galvánico y la piroconversión . . . . .	2
1.4. Hipótesis . . . . .	2
1.5. Objetivos . . . . .	3
<b>2. Desarrollo del modelo matemático</b>	<b>4</b>
2.1. Simplificaciones del sistema . . . . .	5
2.1.1. Elementos y compuestos principales . . . . .	5
2.1.2. Balances de materia . . . . .	5
2.1.3. Procesos físicos . . . . .	6
2.1.4. Propiedades físicas y químicas constantes . . . . .	7
2.1.5. Porcentaje de conversión o de reacción . . . . .	7
2.1.6. Recirculación del electrolito agotado . . . . .	8
2.1.7. Factores estequiométricos . . . . .	8
2.1.8. Estado estable . . . . .	9
2.2. Proceso hidrometalúrgico del zinc convencional . . . . .	9
2.2.1. Balances de materia en la lixiviación neutra . . . . .	11
2.2.2. Balances de materia en la lixiviación ácida-caliente . . . . .	16
2.2.3. Balances de materia en la formación de la jarosita . . . . .	20
2.2.4. Balances de materia en la Electrólisis . . . . .	24
2.3. Proceso hidrometalúrgico del zinc modificado con despojo galvánico y piroconversión . . . . .	25
2.4. Proceso modificado con hierro como reductor . . . . .	26
2.4.1. Lixiviación neutra . . . . .	26
2.4.2. Lixiviación ácida-caliente . . . . .	29
2.4.3. Despojo galvánico y piroconversión . . . . .	32
2.5. Proceso modificado con zinc como reductor . . . . .	40
2.5.1. Despojo galvánico y piroconversión . . . . .	41
2.6. Método de solución . . . . .	45
2.7. Condiciones de operación . . . . .	47

<b>3. Resultados y análisis de resultados</b>	<b>51</b>
3.1. Validación del método de solución . . . . .	51
3.2. Verificación del modelo matemático . . . . .	52
3.3. Efecto del contenido de hierro en la calcina en el proceso convencional . . . . .	52
3.4. Efecto del índice estequiométrico del hierro en el proceso modificado . . . . .	54
3.4.1. Consumo de insumos . . . . .	54
3.4.2. Generación de productos y subproductos . . . . .	56
3.5. Efecto del índice estequiométrico del zinc en el proceso modificado . . . . .	58
3.5.1. Consumo de insumos . . . . .	58
3.5.2. Generación de productos y subproductos . . . . .	59
3.6. Efecto del contenido de hierro en la calcina en los procesos modificados . . . . .	60
3.6.1. Consumo de insumos . . . . .	60
3.6.2. Generación de productos y subproductos . . . . .	62
3.7. Efecto del índice estequiométrico del zinc sobre la concentración de zinc en la corriente $A_3$ . . . . .	64
<b>4. Conclusiones</b>	<b>66</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>
<b>A. Notación para el método de solución del proceso hidrometalúrgico del zinc convencional</b>	<b>69</b>
<b>B. Notación utilizada en el método de solución para el proceso acoplado utilizando hierro como reductor</b>	<b>74</b>
<b>C. Notación utilizada en el método de solución para el proceso acoplado utilizando zinc como reductor</b>	<b>79</b>
<b>D. Diagrama de fases</b>	<b>80</b>
<b>E. Tablas de control</b>	<b>81</b>
<b>F. Código del método de solución</b>	<b>83</b>

# Índice de figuras

2.1.	Diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico del zinc convencional . . . . .	10
2.2.	Diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor . . . . .	25
2.3.	Diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor. . . . .	40
3.1.	Tabla de control del primer tanque de cargo en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor. . . . .	53
3.2.	Efecto del contenido de hierro sobre el consumo de calcina, en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, utilizando una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 en el despojo, un índice estequiométrico del hierro de 2.70 y de 1.70 para el zinc. . . .	54
3.3.	Efecto del contenido de hierro sobre el consumo de insumos y la formación de jarosita en el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc. . . . .	55
3.4.	Efecto del índice estequiométrico del hierro sobre el consumo de insumos, en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, utilizando una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75, una relación acuoso-orgánico en el despojo de 2.00 y un contenido de hierro de 6.5 % Fe en la calcina. . . . .	56
3.5.	Efecto del índice estequiométrico del hierro sobre la formación de productos, en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, utilizando una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75, una relación acuoso-orgánico en el despojo de 2.00 y un contenido de hierro del 6.5 % Fe en la calcina. . . . .	57
3.6.	Efecto del índice estequiométrico del zinc sobre el consumo de insumos en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, utilizando una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75, una relación acuoso-orgánico en el despojo de 2.00 y un contenido de hierro de 6.50 % Fe en la calcina. . . . .	58

3.7. Efecto del índice estequiométrico del zinc sobre la formación de productos en el proceso hidrometalúrgico del zinc modificado con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, utilizando una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75, una relación acuoso-orgánico en el despojo de 2.00 y un contenido de hierro de 6.5 % Fe en la calcina. . . . .	60
3.8. Efecto del contenido de hierro sobre el consumo de insumos, utilizando hierro y zinc como reductores, suponiendo un índice estequiométrico del hierro ( $\zeta_{Fe}$ ) de 2.75 y un índice estequiométrico del zinc ( $\zeta_{Zn}$ ) de 1.70, una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 en el despojo galvánico. . . . .	61
3.9. Efecto del contenido de hierro sobre la formación de productos, utilizando hierro y zinc como reductores, utilizando un índice estequiométrico del hierro de 2.75 y de 1.70 para el zinc, una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 para el despojo galvánico. . . . .	63
3.10. Efecto del contenido de hierro sobre la formación de hidrógeno, utilizando hierro y zinc como reductores, un índice estequiométrico del hierro de 2.75 y de 1.70 para el zinc y una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y 2.00 para el despojo galvánico. . . . .	64
3.11. Efecto del índice estequiométrico del zinc sobre la concentración de zinc en la corriente $A_3$ , para el proceso de implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor, un contenido de hierro en la calcina de 6.5 % Fe, una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 para el despojo galvánico. . . . .	65
D.1. Diagrama de fases $H_2O$ vs $FeCl_2$ . . . . .	80
E.1. Tabla de control del segundo tanque de cargo en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor. . . . .	81
E.2. Tabla de control del tercer tanque de cargo en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor. . . . .	82

# Índice de tablas

2.1. Compuestos de hierro presentes en el proceso hidrometalúrgico del zinc . . . . .	6
2.2. Compuestos de zinc presentes en el proceso hidrometalúrgico del zinc . . . . .	6
2.3. Elementos y compuestos presentes en el proceso hidrometalúrgico del zinc . . . . .	6
2.4. Notación de un balance de materia . . . . .	8
2.5. Fracciones estequiométricas . . . . .	47
2.6. Fracciones estequiométricas (continuación) . . . . .	48
2.7. Fracciones estequiométricas (continuación) . . . . .	48
2.8. Fracciones estequiométricas (continuación) . . . . .	48
2.9. Fracciones estequiométricas (continuación) . . . . .	48
2.10. Fracciones estequiométricas (continuación) . . . . .	49
2.11. Pesos moleculares . . . . .	49
2.12. Pesos moleculares (continuación) . . . . .	49
2.13. Pesos moleculares (continuación) . . . . .	49
2.14. Densidades de compuestos y corrientes . . . . .	50
2.15. Densidades de compuestos y corrientes (continuación) . . . . .	50
2.16. Concentraciones máxicas . . . . .	50
3.1. Raíces obtenidas para cada iteración (k) con el método de solución en Maple 8.0	52
3.2. Raíces obtenidas para cada iteración (k) reportadas en la bibliografía . . . . .	52
A.1. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc . . . . .	69
A.2. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	70
A.3. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	70
A.4. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	70
A.5. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	70
A.6. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	71
A.7. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	71

A.8. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	71
A.9. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	71
A.10. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	72
A.11. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	72
A.12. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	72
A.13. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	72
A.14. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	73
A.15. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	73
A.16. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	73
A.17. Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación) . . . . .	73
B.1. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor . . . . .	74
B.2. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	75
B.3. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	75
B.4. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	75
B.5. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	75
B.6. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	76
B.7. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	76
B.8. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	76
B.9. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	76
B.10. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	77
B.11. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	77

B.12. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	77
B.13. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	77
B.14. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	78
B.15. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	78
B.16. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	78
B.17. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación) . .	78
C.1. Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor . . . . .	79

# Capítulo 1

## Introducción

El hierro es una impureza presente en la mayoría de los procesos hidrometalúrgicos por lo que su eliminación es motivo de realización de este trabajo. En este capítulo se presenta la problemática del hierro así como las soluciones actuales que se llevan a cabo a nivel industrial para hacerle frente, además de la introducción al proceso del despojo galvánico y la piroconversión como posible solución al problema.

### 1.1. La problemática del hierro

El hierro es una impureza presente en el proceso hidrometalúrgico del zinc que afecta principalmente en la formación de cátodos y la eficiencia de corriente durante la electrólisis. El hierro debe ser eliminado del proceso hidrometalúrgico del zinc. El hierro se encuentra contenido en la blenda en un rango de 1.4 a 11.0% Fe, por lo que es factible manejar concentraciones de hierro en el electrolito impuro entre 0.1 y 21  $\frac{g}{l}$  [James (2000)]. En la actualidad, existe un proceso en el cual el hierro es precipitado en forma de un complejo conteniendo amoníaco y llamado "jarosita". El uso de este proceso de eliminación de hierro se encuentra en primer lugar a nivel mundial con un 51% [James (2000)]. La jarosita es un compuesto voluminoso con un bajo contenido de hierro, por lo que su uso a nivel industrial es nulo. La jarosita es almacenada en tanques de jales o depositada directamente en el fondo del mar, por lo que se busca una solución viable ya que el efecto ambiental de esta actividad todavía no es cuantificado.

### 1.2. Procesos actuales para combatir la problemática del hierro

Hoy en día existen otros procesos de eliminación de hierro: el de la goetita y el de la hematita. La goetita  $FeO(OH)$  y la hematita  $Fe_2O_3$  son precipitados termodinámicamente estables con concentraciones bajas de otros iones y cuya solubilidad, a un pH dado, disminuye al aumentar la temperatura. Para obtener un precipitado fácil de filtrar, la solución, después de lixiviar la ferrita de zinc, se reduce con  $SO_2$ , por ejemplo, para llevar el hierro a estado ferroso y el pH se eleva hasta 3 ó 4 añadiéndose algo de caliza. La solución se oxida nuevamente con aire o

con oxígeno formando el precipitado férrico. Si la oxidación se efectúa por debajo de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a presión atmosférica, se forma la goetita, en tanto que a temperaturas mayores de  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  y alta presión, el precipitado es la hematita. En la actualidad estos procesos son utilizados a nivel industrial ocupando el 29 % el proceso de la goetita y el 1 % el proceso de la hematita [James (2000)]. Sin embargo, el uso de estos procesos no soluciona de todo el problema del hierro, ya que los productos obtenidos son dañinos para el medio ambiente. La oxidación de la goetita por causas naturales junto con otros compuestos provoca la formación de drenaje ácido y esta es una de las principales fuentes de contaminación del suelo [Romero] y [Perez (2004)]. Por otro lado la hematita es un compuesto útil para industria siderúrgica pero tiene la desventaja que para poder formarla se requiere de elevar la temperatura de operación, lo que implica un incremento en los costos de producción.

### 1.3. El despojo galvánico y la piroconversión

El despojo galvánico es un proceso alternativo e innovador a la problemática del hierro. El despojo galvánico es una variante de la extracción por solventes ya que consiste de una etapa de cargado y otra de despojo, pero con la diferencia que existe una reacción electroquímica que controla al proceso. Para llevar a cabo la reducción de hierro es necesario un agente reductor. Incluso se han hecho pruebas a nivel laboratorio utilizando hierro y zinc como reductores. El agente despojante fue el ácido clorhídrico, por lo que al final del proceso se obtuvo una solución saturada de cloruro de ferroso. Además, el despojo galvánico se ha podido acoplar al proceso de la piroconversión [Barrera (2002)]. La solución saturada de cloruro ferroso se cristalizó disminuyendo la temperatura de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , formándose cristales de cloruro ferroso tetrahidratados. Luego, los cristales se introdujeron a un horno a una temperatura de  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  para poder llevar a cabo la oxidación en presencia del oxígeno. El oxígeno se alimentó en forma de aire y de agua, por lo que al final del proceso se obtuvo una mezcla gaseosa de cloruro de hidrógeno y vapor de agua. Esta mezcla de gases se enfrió y se introdujo al despojo galvánico para controlar el pH de la solución y favorecer las condiciones de reducción. Las reacciones químicas, los factores físicos así como las suposiciones que se tomaron para la formulación de este proceso se desarrollan y se explican por completo en el capítulo siguiente.

### 1.4. Hipótesis

Debido a que en la actualidad este proceso se ha desarrollado a nivel laboratorio, considerando únicamente la etapa del despojo galvánico y la piroconversión, no se ha podido cuantificar los resultados de su acoplamiento al proceso hidrometalúrgico del zinc sustituyendo la etapa de formación de la jarosita. Al mismo tiempo, no existen resultados previos sobre los balances de materia del proceso acoplado para justificar su posible implantación a nivel planta piloto. Este trabajo busca aportar esos resultados para sustentar su posible implantación, por lo que se ha tratado de apegar lo más posible a la realidad en cuanto al proceso hidrometalúrgico convencional del zinc y el proceso acoplado con el despojo galvánico y la piroconversión. Por lo que la hipótesis de trabajo que se puede plantear es: "Si es posible desarrollar un modelo matemático

a partir de los balances de materia entonces se podrá simular el proceso hidrometalúrgico del zinc en su forma convencional y acoplado al proceso del despojo galvánico y la piroconversión".

## 1.5. Objetivos

De acuerdo a lo señalado anteriormente en este trabajo se buscan los siguientes objetivos:

1. Desarrollar un modelo matemático que permita simular el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc por medio de los balances de materia correspondientes a cada una de las etapas del proceso, con la finalidad de poder cuantificar la cantidad de jarosita que forma utilizando este proceso.
2. Similarmente, construir un modelo matemático que describa el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión en sus dos variantes: 1) utilizando hierro como reductor y 2) utilizando zinc como reductor, con la finalidad de poder cuantificar de manera teórica, los resultados que justifiquen el desarrollo del proceso a nivel planta piloto.
3. Evaluar el efecto de las variables críticas sobre la propuesta del despojo galvánico y la piroconversión en sus respectivas versiones.
4. Determinar si los procesos propuestos son viables desde el punto de vista teórico.

## Capítulo 2

# Desarrollo del modelo matemático

Para desarrollar un modelo matemático que permita simular el efecto de las variables independientes sobre las variables dependientes del proceso hidrometalúrgico del zinc, sin implanación y con implanación del despojo galvánico y la piroconversión, es necesario realizar un análisis global del sistema para conocer sus magnitudes, los mecanismos controlantes, los elementos participantes, así como los compuestos que estos forman dentro del sistema real. Para esto, primeramente se realizó un análisis riguroso del diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico del zinc. Se observó lo extensa y compleja que es una planta hidrometalúrgica de zinc, ya que en este proceso se separa a cada uno de los elementos presentes como impurezas, por ejemplo: el cobre, la plata, el plomo, el cobalto, el zinc y el hierro, por mencionar algunos. Aunque, existen elementos que se encuentran en concentraciones de partes por millón y que también forman parte de la carga del sistema.

En la hidrometalurgia del zinc, los procesos químicos son complejos y esto debe considerarse. Por eso, es necesario saber de qué operaciones consiste y de qué etapas está compuesto el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc. Esto se llevó a cabo conociendo el diagrama del proceso. Este diagrama de la planta fue facilitado por servicios Industriales Peñoles S. A. de C. V. y puede afirmarse que es el diagrama de flujo del área húmeda del proyecto de ampliación de la planta de Zn a 220 000 tpa que opera en la actualidad. Una versión adaptada de este diagrama consiste de una red de flujo a través de los procesos involucrados para la extracción de los diferentes elementos y se muestra en la figura 2.1, de la página 10. Asimismo, en el diagrama se ilustran algunos de los procesos químicos de los cuales están denotados por tanques de lixiviación de calcina. También se muestran procesos físicos, entre los cuales destacan los que ocurren en los tanques sedimentadores, donde las pulpas son separadas por medio de la gravedad o la diferencia de densidades entre los sólidos en suspensión y las soluciones acuosas. Algunas de estas, están representadas por filtros prensa para liberar los sólidos precipitados. Sin embargo, los procesos químicos son los que forman la parte esencial de la hidrometalurgia del zinc.

Los tanques de lixiviación son reactores químicos; por lo que es necesario conocer las diferentes reacciones químicas que ocurren dentro de cada uno de ellos, especialmente en los tanques de precipitación de jarosita, donde la formación de este complejo es la reacción predominante.

Además de las reacciones químicas en los tanques de lixiviación y por consiguiente en la hidrometalurgia del zinc, existen otros factores que afectan al sistema. La temperatura, la concentración y la agitación son parámetros que controlan la cinética de las reacciones durante la

lixiviación y otros procesos. Los mecanismos de transporte de energía y de masa y la termodinámica gobiernan los equilibrios químicos y físicos de las disoluciones y hacen que el sistema sea muy complejo. Por eso, es necesario realizar simplificaciones que faciliten el desarrollo de un modelo matemático adecuado que describa el sistema y que permita obtener resultados de acuerdo a los objetivos ya planteados.

## 2.1. Simplificaciones del sistema

Con el fin de desarrollar un modelo matemático para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc y para el proceso con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, y considerando el diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10 se llevaron a cabo las siguientes simplificaciones.

### 2.1.1. Elementos y compuestos principales

El zinc, es sumamente importante ya que el proceso está destinado principalmente a producir este elemento. Es por esto que se requiere saber el efecto de la eliminación de hierro con la implantación del despojo galvánico y la piroconversión sobre el zinc, además de que el zinc puede formar parte como reductor en el despojo galvánico. Debido a estas razones, el zinc se considera en todos los procesos.

El hierro es una impureza que afecta principalmente a la formación de los catodos de zinc durante la purificación. Su análisis es de vital importancia para este trabajo, ya que la implantación del despojo galvánico y la piroconversión es una opción innovadora para la eliminación del hierro del sistema. Los demás elementos que se encuentran presentes dentro del sistema, tales como el cobre, la plata, el plomo, etc., pueden ser descartados por el momento, debido a que se trata de un primer trabajo que busca encontrar el efecto de la implantación del despojo galvánico y la piroconversión, siendo el zinc y el hierro los principales elementos afectados por esta implantación. Por otra parte, también se debe de tomar en cuenta el ión sulfato, ya que éste regula la entrada de electrolito agotado al sistema, el cual sirve para llevar a cabo las reacciones que ocurren dentro de los tanques de lixiviación y otros procesos.

En la tabla 2.1, de la página 6, se muestran los principales compuestos de hierro que forman parte del proceso hidrometalúrgico del zinc sin implantación y con implantación del despojo galvánico y la piroconversión.

Los elementos y compuestos de zinc al igual que los compuestos que forman parte del proceso hidrometalúrgico del zinc, se muestran en las tablas 2.2 y 2.3, de la página 6.

### 2.1.2. Balances de materia

Para una adecuada descripción matemática del proceso es necesario construir balances de materia, que permitan cuantificar los fenómenos que ocurren dentro de las distintas partes de la operación. Estos balances describen el sistema de una forma macroscópica, tomando en cuenta esencialmente la entrada y salida de los compuestos y los componentes. Estos balances son construidos para aquellos elementos y compuestos de interés, como son el zinc, el hierro y el ión

Elemento	Compuesto	Nombre	Abreviatura
<i>Fe</i>	$Fe_2O_3$	Hematita	<i>Hm</i>
	$Fe(OH)_3$	Hidróxido férrico	<i>HF</i>
	$Fe_2(SO_4)_3$	Sulfato férrico	<i>SF</i>
	$FeCl_2$	Cloruro ferroso	<i>CF</i>
	$FeCl_2 \cdot 4H_2O$	Cloruro ferroso tetrahidratado	<i>CFT</i>
	$NH_4[Fe_3(SO_4)_2(OH)_6]$	Jarosita	<i>J</i>
	$Fe(HA)_2 A_2$	Complejo de $Fe^{(II)}$	<i>FII</i>
	$Fe(HA)_3 A_3$	Complejo de $Fe^{(III)}$	<i>FIII</i>

Tabla 2.1: Compuestos de hierro presentes en el proceso hidrometalúrgico del zinc

Elemento	Compuesto	Nombre	Abreviatura
<i>Zn</i>	$ZnO$	Zincita	<i>Cn</i>
	$ZnSO_4$	Sulfato de zinc	<i>SZ</i>
	$ZnCl_2$	Cloruro de zinc	<i>CZ</i>
	$Zn(HA)_2 A_2$	Complejo de $Zn^{(II)}$	<i>ZII</i>

Tabla 2.2: Compuestos de zinc presentes en el proceso hidrometalúrgico del zinc

sulfato. Este último es de interés especial debido a que controla el flujo de electrolito agotado que circula por el sistema. Estos balances constituyen la estructura principal del proceso ya, que cualquier alteración repercute en estos balances. La solución de los balances de materia también valida el sistema puesto que estos deben cuadrar.

### 2.1.3. Procesos físicos

Los procesos físicos que se destacan en la hidrometalurgia del zinc pueden clasificarse en 2 tipos: 1) los de separación de fases y 2) los de separación de corrientes. Entre los procesos de separación de fases están los tanques sedimentadores y los filtros prensa. Los procesos de separación de fases permiten separar la pulpa en una corriente de sólidos y una de líquidos. Para la elaboración de este modelo matemático, se considera una separación de fases del 100 %.

Compuesto	Nombre	Abreviatura
$H_2SO_4$	Ácido sulfúrico	<i>AS</i>
$HCl$	Ácido clorhídrico	<i>HCl</i>
$H_2O$	Agua	<i>HO</i>
$NH_4$	Amoníaco	<i>Am</i>
$HA$	Ácido orgánico DEHPA	<i>HA</i>
$H_2$	Hidrógeno	<i>h</i>
$O_2$	Oxígeno	<i>OG</i>
$N_2$	Nitrógeno	<i>NG</i>

Tabla 2.3: Elementos y compuestos presentes en el proceso hidrometalúrgico del zinc

Por esto, no se requiere simular los procesos físicos de separación de fases. Al considerar una separación del 100% hace necesario proponer 2 tipos de corrientes: 1) la de líquidos y 2) la de sólidos. Las corrientes de líquidos llevan todos los compuestos que se encuentran en solución acuosa, mientras que las corrientes de sólidos consideran a las fases sólidas como son la de las ferritas y los precipitados sólidos como los hidróxidos y los compuestos complejos. Los procesos físicos de separación de corriente se modelan mediante los divisores de corriente y los mezcladores de corrientes. Para la simulación de estos procesos se consideran factores de separación establecidos por el diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

#### 2.1.4. Propiedades físicas y químicas constantes

Entre las parámetros químicos y físicos se tiene el pH de solución, la temperatura de operación, la concentración del electrolito agotado, las densidades de corriente, las densidades de los compuestos y la concentración de hierro en la etapa de cristalización. Estas variables se consideraron constantes respecto a la composición y el flujo según se detalla a continuación. Durante la etapa de lixiviación neutra se considera un pH relativamente alto y constante es decir alrededor de 5 y 6 lo que obliga a que el hierro precipite según su diagrama de predominancia pH vs potencial de oxígeno, impidiéndose así el transporte de hierro hacia la etapa de purificación del zinc, la concentración de ión hidrógeno es por lo tanto prácticamente cero. Similarmente esto sucede en la etapa de lixiviación ácida-caliente, donde se usa una temperatura alrededor de los 80°C y un pH bajo y constante, provocando que el ión férrico vuelva a solubilizarse para formar el sulfato férrico, el cual es conducido al proceso de formación de la jarosita o al despojo galvánico, según sea el caso. Otra etapa donde se aplica este tipo de suposición es la cristalización del cloruro ferroso tetrahidratado. En esta etapa se considera una concentración de hierro constante en la corriente acuosa  $A_{15}$ , lo que obliga al sistema a corregir la concentración de hierro en la corriente  $A_{12}$ , esta concentración de saturación se obtiene a partir del diagrama de fases del cloruro ferroso vs agua a la temperatura de operación, véase D.1, de la página 80. Por otro lado, las densidades de pulpa y de las corrientes acuosas fueron tomadas como constantes de acuerdo a los valores señalados en el diagrama de flujo.

#### 2.1.5. Porcentaje de conversión o de reacción

Se consideran porcentajes de conversión o de reacción constantes. Estos porcentajes de conversión aplican exclusivamente para la hematita y la zincita en las etapas de lixiviación neutra, lixiviación ácida-caliente y lixiviación de la jarosita. Estos porcentajes de conversión se expresan de acuerdo a la ecuación 2.1:

$$\% \gamma_i = 100 \times \frac{m_{A_f}}{m_{A_i}} \quad (2.1)$$

donde  $m_{A_i}$  es la masa del reactivo  $A$  suministrada,  $m_{A_f}$  es la masa del reactivo  $A$  consumida y  $\% \gamma_i$  es el porcentaje de reacción o de conversión de la especie  $i$ . Esta ecuación es característica para cada una de las reacciones en cada uno de los tanques de lixiviación involucrados

### 2.1.6. Recirculación del electrolito agotado

Para poder llevar a cabo las reacciones de lixiviación de las ferritas es necesario garantizar la alimentación de electrolito agotado y esto se logra mediante su recirculación. El electrolito agotado se recircula a cada uno de los tanques de lixiviación y cada una de estas alimentaciones se calcula durante la solución del sistema. Esto se logra mediante la ecuación 2.2, la cual determina la cantidad de electrolito agotado en función de las ferritas alimentadas y la concentración de ácido sulfúrico en el electrolito agotado:

$$Q_{Ea} = \frac{\left( \sum \frac{\nu_i m_i}{M_i} \right) \cdot M_{H_2SO_4}}{\rho_{H_2SO_4}^{Ea}} \quad (2.2)$$

donde  $\nu_i$  es el coeficiente estequiométrico de la especie  $i$ ,  $m_i$  es la masa de la especie  $i$ ,  $M_i$  es el peso molecular de la especie  $i$ ,  $M_{H_2SO_4}$  es el peso molecular del ácido sulfúrico y  $\rho_{H_2SO_4}^{Ea}$  es la concentración de ácido sulfúrico en el electrolito agotado. La deducción de esta ecuación se presenta en la página 17 del capítulo 2.

### 2.1.7. Factores estequiométricos

La estequiometría de los compuestos se considera también en los balances de materia. Al reaccionar los compuestos se debe determinar la cantidad de sustancia involucrada según el balance de materia. Por ejemplo, en un balance de materia para el hierro en un tanque de lixiviación neutra, las especies involucradas podrían ser la hematita, el hidróxido férrico y el sulfato férrico. Por lo tanto es necesario conocer los factores estequiométricos es decir, las fracciones de hierro en cada uno de los compuestos. La ecuación 2.3 representa el balance de materia para el hierro en un tanque de lixiviación neutra.

$$\omega_{Hm}^1 W_1 \xi_{Fe}^{Hm} + \rho_{SF}^2 Q_2 \xi_{Fe}^{SF} = \omega_{Hm}^3 W_3 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^3 W_3 \xi_{Fe}^{HF} \quad (2.3)$$

El significado de cada uno de los términos se expresa en la tabla 2.4

Variable	Significado
$\omega_{Hm}^1$	Fracción másica de hematita en la corriente 1
$\omega_{Hm}^2$	Fracción másica de hematita en la corriente 2
$\omega_{HF}^3$	Fracción másica del hidróxido férrico en la corriente 3
$W_1$	Flujo másico de la corriente 1
$W_3$	Flujo másico de la corriente 3
$\rho_{SF}^2$	Concentración de sulfato férrico en la corriente 2
$Q_2$	Flujo volumétrico de la corriente 2
$\xi_{Fe}^{Hm}$	Fracción de hierro en la hematita
$\xi_{Fe}^{HF}$	Fracción de hierro en el hidróxido férrico
$\xi_{Fe}^{SF}$	Fracción de hierro en el sulfato férrico

Tabla 2.4: Notación de un balance de materia

Debe señalarse que la notación utilizada en este trabajo involucra los siguientes símbolos:  $\omega$ , que representa una fracción másica que es adimensional.  $W$  significa un flujo másico en  $\left(\frac{kg}{hr}\right)$ .  $\rho$  representa la concentración másica en  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$  y  $Q$  es el flujo volumínico en  $\left(\frac{m^3}{hr}\right)$ . Los términos  $\xi_{Fe}^{Hm}$ ,  $\xi_{Fe}^{HF}$  y  $\xi_{Fe}^{SF}$  son las relaciones o factores estequiométricos que existen entre el elemento y el compuesto. Este tipo de relación determina la certeza del balance de materia ya que la menor perturbación en la magnitud de este valor produce un error evidente al comprobar dicho balance. Estas relaciones se determinan a partir de la ecuación 2.4:

$$\xi_i^j = \frac{M_i}{M_j} \quad (2.4)$$

donde  $i$  y  $j$  es el elemento y el compuesto respectivamente, mientras que  $M_i$  es el peso molecular de la especie  $i$  y  $M_j$  es el peso molecular del compuesto  $j$ . Por ejemplo, en la ecuación 2.5, de la página 9, se expresa la relación másica existente entre el hierro y la hematita:

$$\xi_{Fe}^{Hm} = \frac{2 \cdot M_{Fe}}{M_{Hm}} \quad (2.5)$$

el número 2 es el número de átomos de Fe que hay en la molécula de hematita ( $Fe_2O_3$ ).

### 2.1.8. Estado estable

Una de las principales simplificaciones es considerar que el sistema se encuentra en estado estable, es decir que no hay alteración por el efecto del tiempo. Las fracciones másicas y las concentraciones así como los flujos permanecen constantes en función del tiempo en todo el sistema a condiciones de trabajo ya establecidas. Las únicas posibilidades de alteración sobre las condiciones de trabajo son producto de la manipulación de las variables de entrada como son: el cambio en el flujo de alimentación de la calcina, en los índices estequiométricos, en las densidades de los compuestos y de las corrientes, así como en las concentraciones de los compuestos en el electrolito agotado.

Tomando en cuenta estas simplificaciones se procede a establecer los balances de materia correspondientes para cada uno de los bloques que forman parte del sistema. Esto se realiza con la finalidad de desarrollar el modelo matemático. Este modelo debe cuantificar los resultados en función de las variables independientes así como de las condiciones de operación. Para realizar una comparación entre el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc y el que tiene implantado el despojo galvánico y la piroconversión, se construye un modelo para cada una de estas variantes.

## 2.2. Proceso hidrometalúrgico del zinc convencional

El proceso hidrometalúrgico del zinc convencional consiste de 3 etapas de proceso y de 12 módulos de operación, cada módulo corresponde a un tanque de lixiviación o algún módulo de separación física. Las etapas de proceso son: 1) lixiviación neutra, 2) lixiviación ácida-caliente y 3) formación de jarosita. A continuación se presentan las etapas de operación así como sus módulos pertinentes:

1. La lixiviación neutra. Esta etapa consiste de los módulos del 1 al 6 de la figura 2.1, de la página 10. En esta etapa se involucran datos de operación específicos: una temperatura no mayor a los  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un pH entre 5 y 6. En esta etapa es donde la mayor parte de la zincita reacciona para formar el  $\text{ZnSO}_4$ , mientras que el hierro (3+) precipita como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Esta precipitación garantiza que al momento de la separación física antes de la purificación, el hierro prácticamente no pasa a la corriente acuosa, ya que queda precipitado con los demás sólidos. Una característica de este proceso es que para redissolver el hierro se eleva la acidez de la solución así como la temperatura de operación, dando lugar a la segunda etapa de proceso.

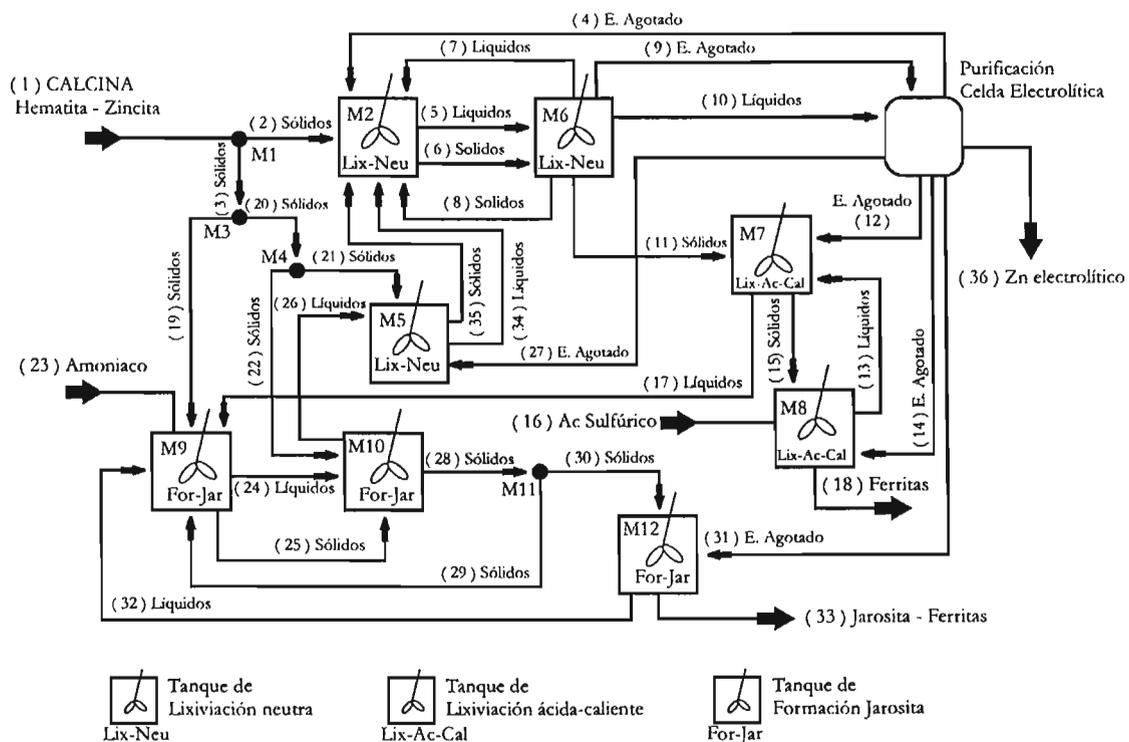


Figura 2.1: Diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico del zinc convencional

2. La lixiviación ácida-caliente. Esta etapa consiste de los módulos 7 y 8 de la figura 2.1, de la página 10. En esta etapa el pH de la solución disminuye entre los valores 2 y 3, y la temperatura asciende alrededor de los  $90^{\circ}\text{C}$ . Esto provoca que el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  se disuelva a causa de la disminución del pH formandose a su vez el  $\text{Fe}_2(\text{SO})_3$ , dando lugar a la tercera y última etapa de proceso.
3. La formación de la jarosita. Esta etapa consiste de los módulos del 9 al 12 de la figura 2.1, de la página 10. En estata etapa el  $\text{Fe}_2(\text{SO})_3$  reacciona en presencia de amoniaco para formar el complejo  $\text{NH}_4[\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ , llamado "jarosita", el cual es un precipitado voluminoso con una bajo contenido de hierro. Su utilidad en la industria es nula por lo que generalmente se desecha o se almacena.

### 2.2.1. Balances de materia en la lixiviación neutra

A continuación se presentan los balances de materia correspondientes a cada uno de los módulos así como las restricciones correspondientes.

#### Divisores de corriente (módulo 1 - módulo 3 - módulo 4)

**Balance global másico** El balance de masa total para cada uno de los módulos, se expresa como:

##### Balance de masa en el módulo 1

$$W_1 = W_2 + W_3 \quad (2.6)$$

##### Balance de masa en el módulo 3

$$W_3 = W_{19} + W_{20} \quad (2.7)$$

##### Balance de masa en el módulo 4

$$W_{20} = W_{21} + W_{22} \quad (2.8)$$

Además existe una serie de restricciones emanadas de criterios de operación y que se plasmaron en el diagrama de flujo para cada uno de los módulos:

##### Restricción del módulo 1

$$W_2 = \alpha_{M_1} \cdot W_1 \quad (2.9)$$

##### Restricción del módulo 3

$$W_{19} = \alpha_{M_3} \cdot W_3 \quad (2.10)$$

##### Restricción del módulo 4

$$W_{21} = \alpha_{M_4} \cdot W_{20} \quad (2.11)$$

donde  $\alpha_{M_1}$ ,  $\alpha_{M_3}$  y  $\alpha_{M_4}$  son los factores de separación para cada uno de los módulos. Estos valores proporcionan la relación entre los flujos másicos de salida y el flujo másico de entrada. Los valores de  $\alpha_{M_1}$ ,  $\alpha_{M_3}$  y  $\alpha_{M_4}$  se obtuvieron a partir del diagrama de flujo mostrado en la figura 2.1, de la página 10.

**Balance de materia por componentes** Debido a que se trata de divisores de corriente las fracciones másicas de la hematita se conservan, es decir:

$$\omega_{Hm}^1 = \omega_{Hm}^2 = \omega_{Hm}^3 = \omega_{Hm}^{19} = \omega_{Hm}^{20} = \omega_{Hm}^{21} = \omega_{Hm}^{22} = X \quad (2.12)$$

lo mismo sucede con la zincita:

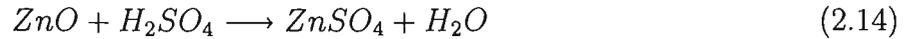
$$\omega_{Cn}^1 = \omega_{Cn}^2 = \omega_{Cn}^3 = \omega_{Cn}^{19} = \omega_{Cn}^{20} = \omega_{Cn}^{21} = \omega_{Cn}^{22} = Y \quad (2.13)$$

Estas variables adquieren la composición química a la entrada del proceso.

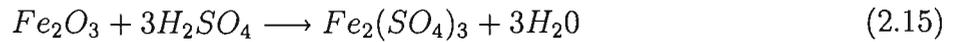
### Tanque de Lixiviación con precipitación de hierro (módulo 2)

Las reacciones químicas que ocurren en la lixiviación neutra son:

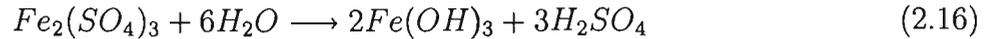
Reacción química de formación del sulfato de zinc



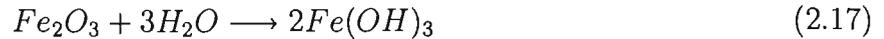
Reacción química de formación del sulfato férrico



Además, debido a que el pH de la solución oscila entre 5 y 6, el sulfato férrico se ha hidrolizado de acuerdo a la siguiente reacción:



por lo tanto la reacción global para el hierro en la lixiviación neutra, sumando las reacciones 2.15 y 2.16 es:



Con esta reacción química se puede expresar que no hay un consumo neto de ácido sulfúrico por parte de la hematita durante la etapa de lixiviación neutra.

**Recirculación del electrolito agotado** Las concentraciones de ácido sulfúrico y de sulfato de zinc en el electrolito agotado son las mismas para cada una de las corrientes involucradas en suministrar dicha solución al sistema, por lo que se utiliza un mismo símbolo para cada una de estas concentraciones másicas, es decir:

Concentración del sulfato de zinc en el electrolito agotado

$$\rho_{SZ}^4 = \rho_{SZ}^9 = \rho_{SZ}^{12} = \rho_{SZ}^{14} = \rho_{SZ}^{27} = \rho_{SZ}^{31} = \rho_{SZ}^{Ea} \quad (2.18)$$

Concentración del ácido sulfúrico en el electrolito agotado

$$\rho_{AS}^4 = \rho_{AS}^9 = \rho_{AS}^{12} = \rho_{AS}^{14} = \rho_{AS}^{27} = \rho_{AS}^{31} = \rho_{AS}^{Ea} \quad (2.19)$$

**Balance de materia por componentes** De acuerdo a lo anterior, los balances de materia correspondientes para el módulo 2, se expresan como:

**Balance de materia del hierro**

$$\begin{aligned} \omega_{Hm}^2 W_2 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{Hm}^8 W_8 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^8 W_8 \xi_{Fe}^{HF} + \omega_{Hm}^{35} W_{35} \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^{35} W_{35} \xi_{Fe}^{HF} = \\ \omega_{Hm}^6 W_6 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^6 W_6 \xi_{Fe}^{HF} \end{aligned} \quad (2.20)$$

**Balance de materia del zinc**

$$\begin{aligned} \omega_{Cn}^2 W_2 \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_4 \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^8 W_8 \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^7 Q_7 \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^{35} W_{35} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{34} Q_{34} \xi_{Zn}^{SZ} = \\ \omega_{Cn}^6 W_6 \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^5 Q_5 \xi_{Zn}^{SZ} \end{aligned} \quad (2.21)$$

**Balance de materia del anión sulfato**

$$\rho_{AS}^{Ea} Q_4 \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_4 \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{SZ}^7 Q_7 \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{SZ}^{34} Q_{34} \xi_{SO}^{SZ} = \rho_{SZ}^5 Q_5 \xi_{SO}^{SZ} \quad (2.22)$$

**Balance de materia de la hematita**

$$\omega_{Hm}^6 W_6 \xi_{Fe}^{Hm} = \left(1 - \frac{\gamma_{Hm}}{100}\right) \cdot (XW_2 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{Hm}^8 W_8 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{Hm}^{35} W_{35} \xi_{Fe}^{Hm}) \quad (2.23)$$

donde  $\gamma_{Hm}$  es el porcentaje de reacción de la hematita.

**Balance de materia de la zincita**

$$\omega_{Cn}^6 W_6 \xi_{Zn}^{Cn} = \left(1 - \frac{\gamma_{Cn}}{100}\right) \cdot (YW_2 \xi_{Zn}^{Cn} + \omega_{Cn}^8 W_8 \xi_{Zn}^{Cn} + \omega_{Cn}^{35} W_{35} \xi_{Zn}^{Cn}) \quad (2.24)$$

donde  $\gamma_{Cn}$  es el porcentaje de reacción de la zincita

**Balance de materia global** El balance de masa global en el módulo 2, se expresa como:

$$\delta_4 Q_4 + \delta_7 Q_7 + \delta_{34} Q_{34} = \delta_5 Q_5 \quad (2.25)$$

donde  $\delta_4$ ,  $\delta_7$ ,  $\delta_{34}$  y  $\delta_5$  son las densidades respectivas de las corrientes 4, 5, 7 y 34. Estas densidades se obtuvieron del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

**Restricción** Las fracciones másicas en la corriente 6 deben cumplir con la siguiente restricción:

$$\omega_{Hm}^6 + \omega_{Cn}^6 + \omega_{HF}^6 = 1 \quad (2.26)$$

**Tanque de lixiviación con precipitación de hierro (módulo 5)**

**Balances de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para el módulo 5, se escriben como:

**Balance de materia del hierro.**

$$XW_{21}\xi_{Fe}^{Hm} + \rho_{SF}^{26}Q_{26}\xi_{Fe}^{SF} = \omega_{Hm}^{35}W_{35}\xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^{35}W_{35}\xi_{Fe}^{HF} \quad (2.27)$$

**Balance de materia del zinc.**

$$YW_{21}\xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{Ea}Q_{27}\xi_{Zn}^{SZ} + \rho_{SZ}^{26}Q_{26}\xi_{Zn}^{SZ} = \omega_{Cn}^{35}W_{35}\xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{34}Q_{34}\xi_{Zn}^{SZ} \quad (2.28)$$

**Balance de materia del anión sulfato**

$$\begin{aligned} \rho_{SZ}^{Ea}Q_{27}\xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{Ea}Q_{27}\xi_{SO}^{AS} + \rho_{SF}^{26}Q_{26}\xi_{SO}^{SF} + \rho_{SZ}^{26}Q_{26}\xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{26}Q_{26}\xi_{SO}^{AS} = \\ \rho_{SZ}^{34}Q_{34}\xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{34}Q_{34}\xi_{SO}^{AS} \end{aligned} \quad (2.29)$$

**Balance de materia de la hematita** El balance de materia que relaciona la hematita residual con la que entra mediante el porcentaje de reacción o de conversión con las variables anteriores, se expresa como:

$$\omega_{Hm}^{35}W_{35} = \left(1 - \frac{\gamma_{Hm}}{100}\right) \cdot XW_{21} \quad (2.30)$$

**Balance de materia de la zincita** Para la zincita, el balance de materia está dado por:

$$\omega_{Cn}^{35}W_{35} = \left(1 - \frac{\gamma_{Cn}}{100}\right) \cdot YW_{21} \quad (2.31)$$

**Balance de materia global** El balance de materia global en el módulo 5, se expresa como:

$$\delta_{26}Q_{26} + \delta_{27}Q_{27} = \delta_{34}Q_{34} \quad (2.32)$$

donde  $\delta_{26}$ ,  $\delta_{27}$  y  $\delta_{34}$  son las densidades de pulpa respectivas a las corrientes 26, 27 y 34. Estas densidades se obtuvieron del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

**Restricción** Las fracciones másicas en la corriente 35 deben cumplir con la siguiente restricción:

$$\omega_{Hm}^{35} + \omega_{HF}^{35} + \omega_{Cn}^{35} = 1 \quad (2.33)$$

**Tanque de lixiviación con precipitación de hierro (módulo 6)**

**Balances de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para el módulo 6, se expresan como:

**Balance de materia del hierro:**

$$\omega_{Hm}^6 W_6 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^6 W_6 \xi_{Fe}^{HF} = \omega_{Hm}^8 W_8 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^8 W_8 \xi_{Fe}^{HF} \quad (2.34)$$

$$\omega_{Hm}^{11} W_{11} \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^{11} W_{11} \xi_{Fe}^{HF} \quad (2.35)$$

**Balance de materia para del zinc**

$$\begin{aligned} \omega_{Cn}^6 W_6 \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^5 Q_5 \xi_{Zn}^{SZ} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_9 \xi_{Zn}^{SZ} = \rho_{SZ}^7 Q_7 \xi_{Zn}^{SZ} + \\ \rho_{SZ}^{10} Q_{10} \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^{11} W_{11} \xi_{Zn}^{Cn} \end{aligned} \quad (2.36)$$

**Balance de materia del anión sulfato**

$$\rho_{SZ}^5 Q_5 \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_9 \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{SZ}^{AS} Q_9 \xi_{SO}^{AS} = \rho_{SZ}^7 Q_7 \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{SZ}^{10} Q_{10} \xi_{SO}^{SZ} \quad (2.37)$$

**Balance de materia de la hematita** El balance de materia que relacionada la hematita residual con la que entra mediante el porcentaje de reacción o de conversión con las variables anteriores, se expresa como:

$$\omega_{Hm}^{M_6} \cdot (W_8 + W_{11}) = \left(1 - \frac{\gamma_{Hm}}{100}\right) \cdot \omega_{Hm}^6 W_6 \quad (2.38)$$

**Balance de materia de la zincita** Para la zincita, el balance de materia está dado por:

$$\omega_{Cn}^{M_6} \cdot (W_8 + W_{11}) = \left(1 - \frac{\gamma_{Cn}}{100}\right) \cdot \omega_{Cn}^6 W_6 \quad (2.39)$$

**Balance de materia global** El balance de materia global en el módulo 6, se expresa como:

$$\delta_5 Q_5 + \delta_9 Q_9 = \delta_7 Q_7 + \delta_{10} Q_{10} \quad (2.40)$$

donde  $\delta_5$ ,  $\delta_7$ ,  $\delta_9$  y  $\delta_{10}$  son las densidades de pulpa de las corrientes 5, 7, 9 y 10 respectivamente. Estas densidades se obtuvieron del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

**Restricciones** Debido a que existe una separación física dentro del tanque de lixiviación, las fracciones másicas para cada uno de los compuestos de la corriente 8 y 11 debe cumplir con lo siguiente:

$$\omega_{Hm}^8 = \omega_{Hm}^{11} = \omega_{Hm}^{M_6} \quad (2.41)$$

para el caso de la hematita, mientras que para la zincita y el hidróxido férrico existen ecuaciones semejantes:

$$\omega_{Cn}^8 = \omega_{Cn}^{11} = \omega_{Cn}^{M_6} \quad (2.42)$$

$$\omega_{HF}^8 = \omega_{HF}^{11} = \omega_{HF}^{M_6} \quad (2.43)$$

Además, las fracciones másicas deben cumplir con la siguiente restricción:

$$\omega_{Hm}^{M_6} + \omega_{Cn}^{M_6} + \omega_{HF}^{M_6} = 1 \quad (2.44)$$

Existe otra restricción referente al factor de separación que existe dentro del tanque de lixiviación, la cual afecta principalmente a las corrientes  $Q_7$  y  $Q_{10}$ , y que se expresa como:

$$\delta_7 Q_7 = \alpha_{M_6} \cdot \delta_{10} Q_{10} \quad (2.45)$$

donde  $\alpha_{M_6}$  es el factor de separación para el módulo 6, este factor se obtuvo a partir del valor reportado en el diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

## 2.2.2. Balances de materia en la lixiviación ácida-caliente

Tanque de lixiviación (módulo 7)

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para el módulo 7, se expresan como:

**Balance de masa del hierro**

$$\omega_{Hm}^{11} W_{11} \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^{11} W_{11} \xi_{Fe}^{HF} + \rho_{SF}^{13} Q_{13} \xi_{Fe}^{SF} = \omega_{Hm}^{15} W_{15} \xi_{Fe}^{Hm} + \rho_{SF}^{17} Q_{17} \xi_{Fe}^{SF} \quad (2.46)$$

**Balance de masa del zinc**

$$\omega_{Cn}^{11} W_{11} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_{12} \xi_{Zn}^{SZ} + \rho_{SZ}^{13} Q_{13} \xi_{Zn}^{SZ} = \omega_{Cn}^{15} W_{15} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{17} Q_{17} \xi_{Zn}^{SZ} \quad (2.47)$$

**Balance de masa del anión sulfato**

$$\begin{aligned} \rho_{SZ}^{Ea} Q_{12} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{Ea} Q_{12} \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SF}^{13} Q_{13} \xi_{SO}^{SF} + \rho_{SZ}^{13} Q_{13} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{13} Q_{13} \xi_{SO}^{AS} = \\ \rho_{SF}^{17} Q_{17} \xi_{SO}^{SF} + \rho_{SZ}^{17} Q_{17} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{17} Q_{17} \xi_{SO}^{AS} \end{aligned} \quad (2.48)$$

**Balance de materia de la hematita** El balance de materia que relaciona la hematita residual con la que entra mediante el porcentaje de reacción o conversión con las variables anteriores, se expresan como:

$$\omega_{Hm}^{15} W_{15} = (1 - \gamma_{Hm}) \cdot \omega_{Hm}^{11} W_{11} \quad (2.49)$$

**Balance de materia de la zincita** Para la zincita, el balance de materia está dado por:

$$\omega_{Cn}^{15} W_{15} = (1 - \gamma_{Cn}) \cdot \omega_{Cn}^{11} W_{11} \quad (2.50)$$

**Balance de materia global** El balance de materia global para el módulo 7, se expresa como:

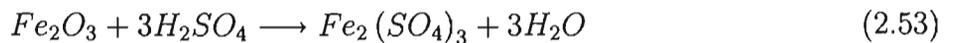
$$\delta_{12} Q_{12} + \delta_{13} Q_{13} = \delta_{17} Q_{17} \quad (2.51)$$

donde  $\delta_{12}$ ,  $\delta_{13}$  y  $\delta_{17}$  son las densidades de pulpa de las corrientes 12, 13 y 17 respectivamente. Estas densidades se obtuvieron a partir del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

**Restricciones** Las fracciones másicas en la corriente 15 deben cumplir con lo siguiente restricción:

$$\omega_{Hm}^{15} + \omega_{Cn}^{15} = 1 \quad (2.52)$$

Otra restricción más es la cantidad de ácido sulfúrico que debe suministrarse para lograr llevar acabo las reacciones de la hematita y la zincita, al igual que la del hidróxido férrico, se determina a partir de la estequiometría de la reacción. Por ejemplo, tomando en cuenta la reacción de disolución del hierro:



se sabe que la relación de moles es que por cada mol de hematita se requieren 3 moles de ácido sulfúrico, por lo tanto con esta relación se puede calcular la cantidad de moles de ácido sulfúrico que se necesitan, es decir:

$$\eta_{AS} = 3 \left( \frac{m_{Hm}}{M_{Hm}} \right) \quad (2.54)$$

donde  $m_{Hm}$  es la masa de hematita y  $M_{Hm}$  es el peso molecular de la hematita. La concentración de ácido sulfúrico en el electrolito agotado es una variable que se puede fijar, lo cual permite determinar el flujo requerido de ácido sulfúrico a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_{AS} = \frac{\eta_{AS} \times M_{AS}}{\rho_{AS}^{Ea}} \quad (2.55)$$

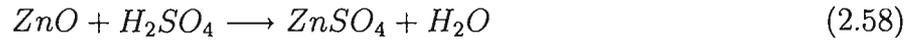
este flujo es exactamente igual al requerido de electrolito agotado que entra al tanque de lixiviación, es decir:

$$Q_{12} = Q_{AS} = \frac{\eta_{AS} \times M_{AS}}{\rho_{AS}^{Ea}} = \frac{3 \left( \frac{m_{Hm}}{M_{Hm}} \right) M_{AS}}{\rho_{AS}^{Ea}} \quad (2.56)$$

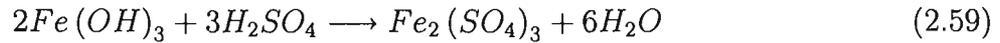
Esta cantidad de ácido es solamente para la hematita. Debido a que también se requiere una aportación extra para la zincita y el hidróxido férrico, este flujo se reescribe con mayor precisión de la siguiente forma:

$$Q_{12} = \frac{M_{AS}}{\rho_{AS}^{Ea}} \left[ \left( 3 \frac{\omega_{Hm}^{11} W_{11}}{M_{Hm}} \right) + \left( 1 \frac{\omega_{Cn}^{11} W_{11}}{M_{Cn}} \right) + \left( 1.5 \frac{\omega_{HF}^{11} W_{11}}{M_{HF}} \right) \right] \quad (2.57)$$

Los factores que acompañan a cada uno de los términos de la ecuación 2.57, se obtienen a partir de:



y de



A partir de las reacciones anteriores se puede deducir la relación que existe entre las moles de zincita y las moles ácido sulfúrico, así como las moles de hidróxido férrico con las moles de ácido, es decir:

$$\eta_{AS} = 1 \left( \frac{m_{Cn}}{M_{Cn}} \right) \quad (2.60)$$

$$\eta_{AS} = \frac{3}{2} \left( \frac{m_{HF}}{M_{HF}} \right) \quad (2.61)$$

la ecuación 2.60, indica la cantidad de moles de ácido sulfúrico que se requieren para la disolución de la zincita y la ecuación 2.61 indica las moles correspondientes al hidróxido férrico.

### Tanque de lixiviación (módulo 8)

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para el módulo 8, se expresan como:

#### Balance de masa del hierro

$$\omega_{Hm}^{15} W_{15} \xi_{Fe}^{Hm} = \omega_{Hm}^{18} W_{18} \xi_{Fe}^{Hm} + \rho_{SF}^{13} Q_{13} \xi_{Fe}^{SF} \quad (2.62)$$

#### Balance de masa del zinc

$$\omega_{Cn}^{15} W_{15} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_{14} \xi_{Zn}^{SZ} = \omega_{Cn}^{18} W_{18} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{13} Q_{13} \xi_{Zn}^{SZ} \quad (2.63)$$

**Balance de masa de anión sulfato**

$$\rho_{SZ}^{Ea} Q_{14} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{Ea} Q_{14} \xi_{SO}^{AS} + \delta_{AS} Q_{AS}^{16} \xi_{SO}^{AS} = \rho_{SF}^{13} Q_{13} \xi_{SO}^{SF} + \rho_{SZ}^{13} Q_{13} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{13} Q_{13} \xi_{SO}^{AS} \quad (2.64)$$

donde  $\delta_{AS}$  es la densidad del ácido sulfúrico en  $\frac{kg}{m^3}$ .

**Balance de materia de la hematita** El balance de materia que relaciona la hematita residual con la que entra por medio del porcentaje de reacción o de conversión con las variables anteriores, se expresan como:

$$\omega_{Hm}^{18} W_{18} = (1 - \gamma_{Hm}) \cdot \omega_{Hm}^{15} W_{15} \quad (2.65)$$

**Balance de materia de la zincita** Para la zincita, el balance de materia está dada por:

$$\omega_{Cn}^{18} W_{18} = (1 - \gamma_{Cn}) \cdot \omega_{Cn}^{15} W_{15} \quad (2.66)$$

**Balance de materia global** El balance de materia global en el módulo 8, se expresa como:

$$\delta_{14} Q_{14} + \delta_{16} Q_{16} = \delta_{13} Q_{13} \quad (2.67)$$

donde  $\delta_{13}$ ,  $\delta_{14}$  y  $\delta_{16}$  son las densidades de pulpa de las corrientes 13, 14 y 16 respectivamente. Los valores de estas densidades se obtuvieron a partir del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

Por otro lado, la masa de sulfato que entra al proceso por la corriente de ácido sulfúrico (16), debe ser igual a la cantidad de sulfato presente en la jarosita que sale del proceso, es decir:

$$\delta_{AS} Q_{16} \xi_{SO}^{AS} = \omega_{J}^{33} W_{33} \xi_{SO}^J \quad (2.68)$$

Además, en este bloque la masa de ácido sulfúrico que se suministra debe ser la requerida para poder llevar acabo las reacciones de la hematita y zincita no solo para este módulo sino también para el módulo 9 y 10. Debido a que estos módulos no cuentan con el suministro de electrolito agotado, la ecuación para determinarlo, se expresa como:

$$Q_{14} = \frac{M_{AS}}{\rho_{AS}^{Ea}} \left[ 3 \left( \frac{\omega_{Hm}^{11} W_{11} + \omega_{Hm}^{19} W_{19} + \omega_{Hm}^{22} W_{22} + \omega_{Hm}^{29} W_{29}}{M_{Hm}} \right) \right] + \frac{M_{AS}}{\rho_{AS}^{Ea}} \left( \frac{\omega_{Cn}^{11} W_{11} + \omega_{Cn}^{19} W_{19} + \omega_{Cn}^{22} W_{22} + \omega_{Cn}^{29} W_{29}}{M_{Cn}} \right) \quad (2.69)$$

Por otro lado, se requiere de una ecuación similar a la 2.69 para el módulo 5, la cual se expresa como:

$$Q_{27} = \frac{M_{AS}}{\rho_{AS}^{Ea}} \left( \frac{\omega_{Cn}^{21} W_{21}}{M_{Cn}} \right) \quad (2.70)$$

en esta ecuación sólo se toma en cuenta el término de la zincita debido a que el hierro precipita en forma de hidróxido férrico, por lo que no hay consumo de ácido sulfúrico por parte de éste.

**Restricción** Las fracciones másicas en la corriente 18 deben cumplir con la siguiente restricción:

$$\omega_{Hm}^{18} + \omega_{Cn}^{18} = 1 \quad (2.71)$$

### 2.2.3. Balances de materia en la formación de la jarosita

**Tanque de precipitación de la jarosita (módulo 9)**

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para el módulo 9, se expresan como:

**Balance de masa del hierro**

$$\begin{aligned} \omega_{Hm}^{19} W_{19} \xi_{Fe}^{Hm} + \rho_{SF}^{17} Q_{17} \xi_{Fe}^{SF} + \omega_{Hm}^{29} W_{29} \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_J^{29} W_{29} \xi_{Fe}^J + \rho_{SF}^{32} Q_{32} \xi_{Fe}^{SF} = \\ \omega_{Hm}^{25} W_{25} \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_J^{25} W_{25} \xi_{Fe}^J \end{aligned} \quad (2.72)$$

**Balance de masa del zinc**

$$\begin{aligned} \omega_{Cn}^{19} W_{19} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{17} Q_{17} \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^{29} W_{29} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{32} Q_{32} \xi_{Zn}^{SZ} = \\ \omega_{Cn}^{25} W_{25} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{24} Q_{24} \xi_{Zn}^{SZ} \end{aligned} \quad (2.73)$$

**Balance de masa del anión sulfato**

$$\begin{aligned} \rho_{SF}^{17} Q_{17} \xi_{SO}^{SF} + \rho_{SZ}^{17} Q_{17} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{17} Q_{17} \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SF}^{32} Q_{32} \xi_{SO}^{SF} + \rho_{SZ}^{32} Q_{32} \xi_{SO}^{SZ} + \\ \rho_{AS}^{32} Q_{32} \xi_{SO}^{AS} + \omega_J^{29} W_{29} \xi_{SO}^J = \rho_{SZ}^{24} Q_{24} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{24} Q_{24} \xi_{SO}^{AS} + \omega_J^{25} W_{25} \xi_{SO}^J \end{aligned} \quad (2.74)$$

**Balance de masa del catión amonio**

$$\delta_{Am} Q_{23} + \omega_J^{29} W_{29} \xi_{Am}^J = \omega_J^{25} W_{25} \xi_{Am}^J \quad (2.75)$$

**Balance de materia para la hematita** El balance de materia que relaciona la hematita residual con la que entra por medio del porcentaje de reacción o de conversión con las variables anteriores, se expresa como:

$$\omega_{Hm}^{25} W_{25} = (1 - \gamma_{Hm}) \cdot (\omega_{Hm}^{19} W_{19} + \omega_{Hm}^{29} W_{29}) \quad (2.76)$$

**Balance de materia de la zincita** Para el caso de la zincita, el balance de materia en función del porcentaje de reacción o de conversión está dado por:

$$\omega_{Cn}^{25} W_{25} = (1 - \gamma_{Cn}) \cdot (\omega_{Cn}^{19} W_{19} + \omega_{Cn}^{29} W_{29}) \quad (2.77)$$

**Balance de materia global** El balance de materia global para el módulo 9, se encuentra dado:

$$\delta_{17} Q_{17} + \delta_{23} Q_{23} + \delta_{32} Q_{32} = \delta_{24} Q_{24} \quad (2.78)$$

donde  $\delta_{17}$ ,  $\delta_{23}$ ,  $\delta_{24}$  y  $\delta_{32}$  son las densidades de pulpa de las corrientes 17, 23, 24 y 32 respectivamente. Los valores de estas densidades se obtuvieron a partir del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

**Restricción** Las fracciones másicas en la corriente 25 deben cumplir con la siguiente restricción:

$$\omega_{Hm}^{25} + \omega_J^{25} + \omega_{Cn}^{25} = 1 \quad (2.79)$$

### Tanque de lixiviación (módulo 10)

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para el módulo 10, se expresan como:

#### Balance de masa del hierro

$$\begin{aligned} \omega_{Hm}^{22} W_{22} \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_J^{25} W_{25} \xi_{Fe}^J + \rho_{SF}^{24} Q_{24} \xi_{Fe}^{SF} = \omega_{Hm}^{28} W_{28} \xi_{Fe}^{Hm} + \\ \omega_J^{28} W_{28} \xi_{Fe}^J + \rho_{SF}^{26} Q_{26} \xi_{Fe}^{SF} \end{aligned} \quad (2.80)$$

#### Balance de masa del zinc

$$\omega_{Cn}^{22} W_{22} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{24} Q_{24} \xi_{Zn}^{SZ} = \omega_{Cn}^{28} W_{28} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{26} Q_{26} \xi_{Zn}^{SZ} \quad (2.81)$$

**Balance de masa del anión sulfato**

$$\begin{aligned} \rho_{SZ}^{24} Q_{24} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{24} Q_{24} \xi_{SO}^{AS} + \omega_J^{25} W_{25} \xi_{SO}^J = \rho_{SZ}^{26} Q_{26} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{26} Q_{26} \xi_{SO}^{AS} + \\ \rho_{SF}^{26} Q_{26} \xi_{SO}^{SF} + \omega_J^{28} W_{28} \xi_{SO}^J \end{aligned} \quad (2.82)$$

**Balance de masa del catión amonio**

$$\omega_J^{25} W_{25} \xi_{Am}^J = \omega_J^{28} W_{28} \xi_{Am}^J \quad (2.83)$$

**Balance de materia de la hematita** El balance de materia que relaciona la hematita residual con la que entra por medio del porcentaje de reacción o de conversión con las variables anteriores, se expresan como:

$$\omega_{Hm}^{28} W_{28} = (1 - \gamma_{Hm}) \cdot \omega_{Hm}^{22} W_{22} \quad (2.84)$$

**Balance de materia de la zincita** El balance de materia para la zincita en función del porcentaje de reacción o de conversión, se encuentra dado por:

$$\omega_{Cn}^{28} W_{28} = (1 - \gamma_{Cn}) \cdot \omega_{Cn}^{22} W_{22} \quad (2.85)$$

**Balance de materia global** El balance de masa global para el módulo 10, se expresa como:

$$\delta_{24} Q_{24} = \delta_{26} Q_{26} \quad (2.86)$$

donde  $\delta_{24}$  y  $\delta_{26}$  son las densidades de pulpa de las corrientes 24 y 26 respectivamente. Estos valores se obtuvieron a partir del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

**Restricción** Las fracciones másicas en la corriente 28 deben cumplir con la siguiente restricción:

$$\omega_{Hm}^{28} + \omega_{Cn}^{28} + \omega_J^{28} = 1 \quad (2.87)$$

**Divisor de corriente (módulo 11)**

Debido a que se trata de un divisor de corriente las fracciones másicas no varían en ninguna de las corrientes resultantes, es decir:

$$\omega_{Hm}^{28} = \omega_{Hm}^{29} = \omega_{Hm}^{30} \quad (2.88)$$

lo mismo sucede con la zincita y la jarosita:

$$\omega_{Cn}^{28} = \omega_{Cn}^{29} = \omega_{Cn}^{30} \quad (2.89)$$

$$\omega_J^{28} = \omega_J^{29} = \omega_J^{30} \quad (2.90)$$

por lo tanto el único balance de materia involucrado en este módulo es el balance de materia global.

### Balance de materia global

$$W_{28} = W_{29} + W_{30} \quad (2.91)$$

Este balance debe cumplir con la siguiente restricción:

$$W_{30} = \alpha_{M_{11}} W_{28} \quad (2.92)$$

donde  $\alpha_{M_{11}}$  es el factor de separación en el módulo 11. Este factor de separación se obtuvo a partir del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

### Tanque de lixiviación (módulo 12)

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para el módulo 12, se expresan como:

#### Balance de masa del hierro

$$\omega_{Hm}^{30} W_{30} \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_J^{30} W_{30} \xi_{Fe}^J = \omega_{Hm}^{33} W_{33} \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_J^{33} W_{33} \xi_{Fe}^J + \rho_{SF}^{32} Q_{32} \xi_{Fe}^{SF} \quad (2.93)$$

#### Balance de masa del zinc

$$\omega_{Cn}^{30} W_{30} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_{31} \xi_{Zn}^{SZ} = \omega_{Cn}^{33} W_{33} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{32} Q_{32} \xi_{Zn}^{SZ} \quad (2.94)$$

#### Balance de masa del anión sulfato

$$\rho_{SZ}^{Ea} Q_{31} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{Ea} Q_{31} \xi_{SO}^{AS} + \omega_J^{30} W_{30} \xi_{SO}^J = \rho_{SF}^{32} Q_{32} \xi_{SO}^{SF} + \rho_{SZ}^{32} Q_{32} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{32} Q_{32} \xi_{SO}^{AS} + \omega_J^{33} W_{33} \xi_{SO}^J \quad (2.95)$$

#### Balance de masa del catión amonio

$$\omega_J^{30} W_{30} \xi_{Am}^J = \omega_J^{33} W_{33} \xi_{Am}^J \quad (2.96)$$

**Balance de materia de la hematita** El balance de materia que relaciona la hematita residual con la que entra por medio del porcentaje de reacción o de conversión con las variables anteriores, se expresan como:

$$\omega_{Hm}^{33} W_{33} = (1 - \gamma_{Hm}) \cdot \omega_{Hm}^{30} W_{30} \quad (2.97)$$

**Balance de materia de la zincita** Para la zincita, el balance de materia está dado por:

$$\omega_{Cn}^{33} W_{33} = (1 - \gamma_{Cn}) \cdot \omega_{Cn}^{30} W_{30} \quad (2.98)$$

**Balance de materia global** El balance de materia global para el módulo 12, se expresa como:

$$\delta_{31} Q_{31} = \delta_{32} Q_{32} \quad (2.99)$$

donde  $\delta_{31}$  y  $\delta_{32}$  son las densidades de pulpa de las corrientes 31 y 32 respectivamente. Los valores de estas densidades se obtuvieron a partir del diagrama de la figura 2.1, de la página 10.

**Restricción** Las fracciones másicas en la corriente 33 deben cumplir con la siguiente restricción:

$$\omega_{Hm}^{33} + \omega_{Cn}^{33} + \omega_J^{33} = 1 \quad (2.100)$$

## 2.2.4. Balances de materia en la Electrólisis

### Celda electrolítica (módulo 13)

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para el módulo 13 se expresan como:

#### Balance de masa del zinc

$$\rho_{SZ}^{10} Q_{10} \xi_{Zn}^{SZ} = \rho_{SZ}^{Ea} \xi_{Zn}^{SZ} \cdot (Q_4 + Q_9 + Q_{12} + Q_{14} + Q_{27} + Q_{31}) + W_{36Zn} \quad (2.101)$$

donde  $W_{36Zn}$  es el flujo de zinc metálico.

#### Balance de masa del anión sulfato

$$\rho_{SZ}^{10} Q_{10} \xi_{SO}^{SZ} = (\rho_{SZ}^{Ea} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{Ea} \xi_{SO}^{AS}) \cdot (Q_4 + Q_9 + Q_{12} + Q_{14} + Q_{27} + Q_{31}) \quad (2.102)$$

**Balance de materia global** El balance de materia global para el módulo 13, está dado por:

$$\delta_{10} Q_{10} = \delta_{Ea} \cdot (Q_4 + Q_9 + Q_{12} + Q_{14} + Q_{27} + Q_{31}) \quad (2.103)$$

donde  $\delta_{10}$  es la densidad de la corriente 10 y  $\delta_{Ea}$  es la densidad del electrolito agotado. Estas densidades se obtuvieron del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

### 2.3. Proceso hidrometalúrgico del zinc modificado con despojo galvánico y piroconversión

El proceso hidrometalúrgico del zinc modificado es una propuesta de un proceso alterno para evitar la precipitación de la jarosita, el cual consiste en la separación del hierro (3+). Es decir, el licor impuro con alto contenido de hierro proveniente de la lixiviación ácida-caliente, se alimenta al cargado, donde la fase orgánica se carga de hierro y así se obtiene una fase acuosa purificada de hierro, la cual se destina a la electrólisis. La fase orgánica con alto contenido de hierro se alimenta al despojo galvánico, donde el hierro se despoja de la fase orgánica formándose una disolución saturada de cloruro ferroso. Esta solución se envía al cristalizador donde la temperatura desciende de 40 a 20 °C, obteniéndose cristales de cloruro ferroso tetrahidratado, los cuales se destinan a la piroconversión. En este proceso, los cristales de cloruro ferroso reaccionan con la cantidad estequiométrica de aire y agua para producir hematita, desprendiéndose cloruro de hidrógeno, vapor de agua y nitrógeno. Estos gases se absorben en la solución de cloruro ferroso recirculante para formar una disolución de ácido clorhídrico y cloruro ferroso que se utiliza para el control del pH en el despojo. El diagrama de flujo se puede observar en la figura 2.2, de la página 25.

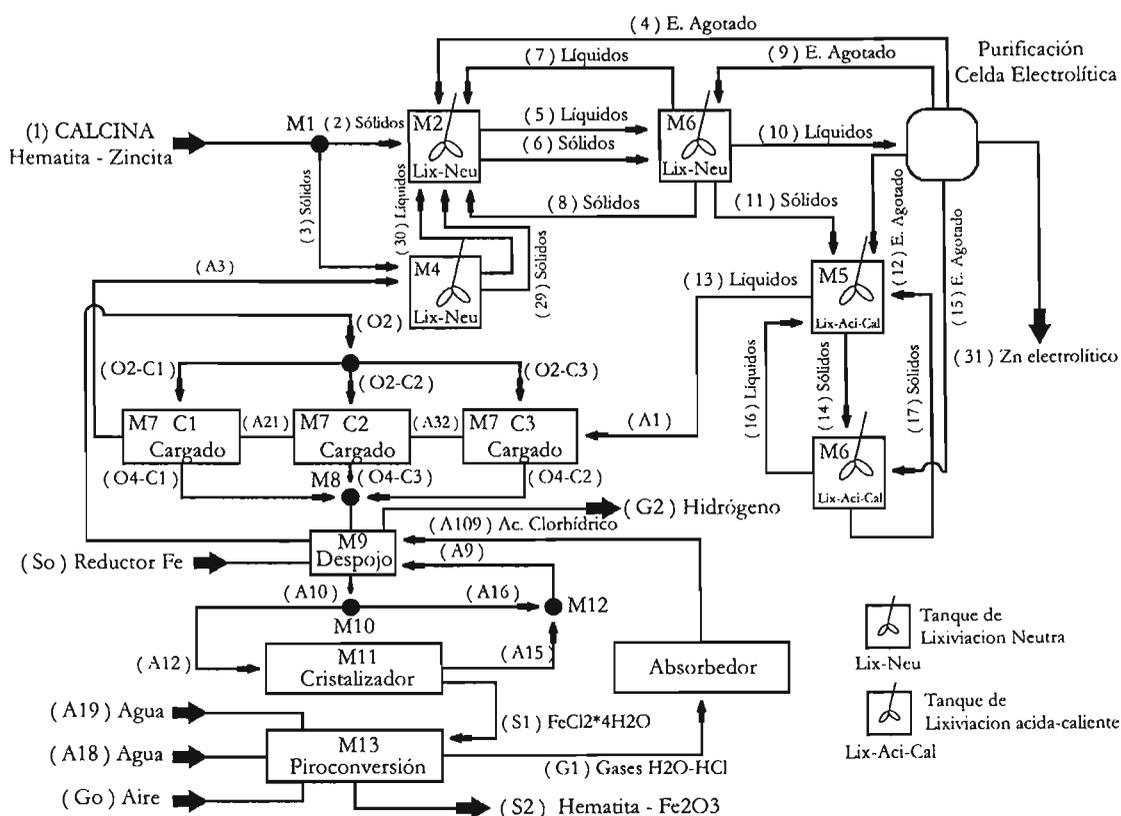


Figura 2.2: Diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor

Este proceso a modelar está conformado por 3 etapas:

1. lixiviación neutra, comprende los módulos del 1 al 4,
2. lixiviación ácida-caliente, comprende los módulos 5 y 6, y
3. el proceso modificado que incluye al despojo galvánico y la piroconversión, y que comprende los módulos del 7 al 12 de la figura 2.2, de la página 25.

Se pueden utilizar dos reductores para llevar a cabo la reducción del hierro durante la etapa del despojo galvánico, los cuales son: el hierro y el zinc. Dado que estos reductores involucran reacciones distintas se realizarán sus balances de materia por separado. A continuación se describen los balances de materia correspondientes para todas las etapas del proceso hidrometalúrgico del zinc modificado.

## 2.4. Proceso modificado con hierro como reductor

### 2.4.1. Lixiviación neutra

La lixiviación neutra se mantiene prácticamente igual con respecto a la del proceso hidrometalúrgico convencional del zinc, por lo que se modela de la misma forma. Sin embargo, para la versión modificada del proceso se cuenta con sólo un divisor de corriente. Las ecuaciones, así como las variables que intervienen en los módulos 3 y 4 del proceso hidrometalúrgico convencional no tienen ninguna aplicación en este sistema.

#### Divisor de corrientes (módulo 1)

Los balances de materia así como las restricciones que se aplican a este módulo se muestran en las ecuaciones 2.6 y 2.9, de la página 11.

**Balance de materia por componentes** Las suposiciones para los balances de materia por componentes se muestran en las ecuaciones 2.12 y 2.13, de la página 12.

#### Tanque de Lixiviación (módulo 2)

Las suposiciones que se hicieron sobre las concentraciones de ácido sulfúrico y de sulfato de zinc, mostradas en las ecuaciones 2.18 y 2.19, de la página 12, también aplican a este sistema. Para este proceso solamente se cuenta con 4 entradas de electrolito agotado, la corriente 4, 9, 12 y 15.

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para este módulo, pueden estar escritos de la misma forma, pero difieren de los anteriores ya que hubo alteraciones al renombrar las variables del proceso. Por ejemplo, la corriente 34 de líquidos del proceso convencional, ahora es la corriente 30 del proceso modificado. A continuación se muestran los balances de materia corregidos para el proceso hidrometalúrgico modificado:

**Balance de masa del hierro**

$$\omega_{Hm}^2 W_2 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{Hm}^8 W_8 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^8 W_8 \xi_{Fe}^{HF} + \omega_{Hm}^{29} W_{29} \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^{29} W_{29} \xi_{Fe}^{HF} = \omega_{Hm}^6 W_6 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^6 W_6 \xi_{Fe}^{HF} \quad (2.104)$$

**Balance de masa del zinc**

$$\omega_{Cn}^2 W_2 \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_4 \xi_{Zn}^{SZ} + \rho_{SZ}^{30} Q_{30} \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^{29} W_{29} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^7 Q_7 \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^8 W_8 \xi_{Zn}^{Cn} = \rho_{SZ}^5 Q_5 \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^6 W_6 \xi_{Zn}^{Cn} \quad (2.105)$$

**Balance de masa del anión sulfato**

$$\rho_{AS}^{Ea} Q_4 \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_4 \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^7 Q_7 \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SZ}^7 Q_7 \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{30} Q_{30} \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SZ}^{30} Q_{30} \xi_{SO}^{SZ} = \rho_{AS}^5 Q_5 \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SZ}^5 Q_5 \xi_{SO}^{SZ} \quad (2.106)$$

**Balance de materia global** El balance de materia global para el módulo 2, se encuentra dado por:

$$\delta_4 Q_4 + \delta_7 Q_7 + \delta_{30} Q_{30} = \delta_5 Q_5 \quad (2.107)$$

las densidades expresadas en la ecuación 2.107, se obtuvieron del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

**Balance de materia de la hematita** El balance de materia que relaciona la hematita residual con la que entra por medio del porcentaje de reacción o de conversión con las variables anteriores, se expresa como:

$$\omega_{Hm}^6 W_6 = \left(1 - \frac{\gamma_{Hm}}{100}\right) \cdot (\omega_{Hm}^2 W_2 + \omega_{Hm}^8 W_8 + \omega_{Hm}^{29} W_{29}) \quad (2.108)$$

**Balance de materia de la zincita** Para el caso de la zincita, el balance de materia se encuentra dado:

$$\omega_{Cn}^6 W_6 = \left(1 - \frac{\gamma_{Cn}}{100}\right) \cdot (\omega_{Cn}^2 W_2 + \omega_{Cn}^8 W_8 + \omega_{Cn}^{29} W_{29}) \quad (2.109)$$

**Restricción** Las fracciones másicas en este módulo deben cumplir con la ecuación 2.26, de la página 13.

**Tanque de Lixiviación (módulo 3)**

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para el módulo 3 difieren de los balances presentados en el módulo 6 en el proceso convencional del zinc, ver página 15. A continuación se presentan los balances modificados con la nueva notación utilizada:

**Balance de masa del hierro**

$$\begin{aligned} \omega_{Hm}^6 W_6 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^6 W_6 \xi_{Fe}^{HF} = \omega_{Hm}^8 W_8 \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^8 W_8 \xi_{Fe}^{HF} + \\ \omega_{Hm}^{11} W_{11} \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^{11} W_{11} \xi_{Fe}^{HF} \end{aligned} \quad (2.110)$$

**Balance de masa del zinc**

$$\begin{aligned} \omega_{Cn}^6 W_6 \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^5 Q_5 \xi_{Zn}^{SZ} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_9 \xi_{Zn}^{SZ} = \omega_{Cn}^8 W_8 \xi_{Zn}^{Cn} + \\ \omega_{Cn}^{11} W_{11} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^7 Q_7 \xi_{Zn}^{SZ} + \rho_{SZ}^{10} Q_{10} \xi_{Zn}^{SZ} \end{aligned} \quad (2.111)$$

**Balance de masa del anión sulfato**

$$\begin{aligned} \rho_{AS}^5 Q_5 \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SZ}^5 Q_5 \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{Ea} Q_9 \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_9 \xi_{SO}^{SZ} = \rho_{AS}^7 Q_7 \xi_{SO}^{AS} + \\ \rho_{SZ}^7 Q_7 \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{10} Q_{10} \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SZ}^{10} Q_{10} \xi_{SO}^{SZ} \end{aligned} \quad (2.112)$$

**Balance de materia de la hematita** El balance de materia que relaciona la hematita residual con la que entra por medio del porcentaje de reacción o de conversión con las variables anteriores, se expresa como:

$$\omega_{Hm}^{M_6} \cdot (W_8 + W_{11}) = \left(1 - \frac{\gamma_{Hm}}{100}\right) \cdot \omega_{Hm}^6 W_6 \quad (2.113)$$

**Balance de materia de la zincita** Para el caso de la zincita, el balance de materia se encuentra dado por:

$$\omega_{Cn}^{M_6} \cdot (W_8 + W_{11}) = \left(1 - \frac{\gamma_{Cn}}{100}\right) \cdot \omega_{Cn}^6 W_6 \quad (2.114)$$

**Balance de materia global** El balance de materia global en el módulo 3, se expresa como:

$$\delta_5 Q_5 + \delta_9 Q_9 = \delta_7 Q_7 + \delta_{10} Q_{10} \quad (2.115)$$

**Restricciones** Las restricciones para las fracciones másicas se muestran en las ecuaciones 2.41, 2.42, 2.43 y 2.44, de la página 12.

**Tanque de Lixiviación (módulo 4)**

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia para el módulo 4, se expresan como:

**Balance de masa del hierro**

$$\omega_{Hm}^3 W_3 \xi_{Fe}^{Hm} + \rho_{SF}^{28} Q_{28} \xi_{Fe}^{SF} = \omega_{Hm}^{29} W_{29} \xi_{Fe}^{Hm} + \omega_{HF}^{29} W_{29} \xi_{Fe}^{HF} \quad (2.116)$$

**Balance de masa del zinc**

$$\begin{aligned} \omega_{Cn}^3 W_3 \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_{31} \xi_{Zn}^{SZ} + \rho_{SZ}^{28} Q_{28} \xi_{Zn}^{SZ} = \\ \rho_{SZ}^{30} Q_{30} \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^{29} W_{29} \xi_{Zn}^{Cn} \end{aligned} \quad (2.117)$$

**Balance de masa del anión sulfato**

$$\begin{aligned} \rho_{SZ}^{Ea} W_{31} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{Ea} W_{31} \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SF}^{28} Q_{28} \xi_{SO}^{SF} + \rho_{SZ}^{28} Q_{28} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{28} Q_{28} \xi_{SO}^{AS} = \\ \rho_{SZ}^{30} W_{30} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{30} W_{30} \xi_{SO}^{AS} \end{aligned} \quad (2.118)$$

**Balance de materia de la hematita** El balance de materia que relaciona la hematita residual con la que entra por medio del porcentaje de reacción o de conversión con las variables mostradas en los balances de materia anteriores, se expresa como:

$$\omega_{Hm}^{29} W_{29} = (1 - \gamma_{Hm}) \cdot XW_3 \quad (2.119)$$

**Balance de materia de la zincita** El balance de materia correspondiente para la zincita en función del porcentaje de reacción o de conversión, se encuentra dado por:

$$\omega_{Cn}^{29} W_{29} = (1 - \gamma_{Cn}) \cdot YW_3 \quad (2.120)$$

**Balance de materia global** El balance materia global para el módulo 4, esta dado por:

$$\delta_{31} Q_{31} + \delta_{28} Q_{28} = \delta_{30} Q_{30} \quad (2.121)$$

las densidades de pulpa  $\delta_{28}$ ,  $\delta_{30}$  y  $\delta_{31}$ , son obtenidas a partir del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

**Restricción** Las fracciones máxicas en la corriente 29 deben cumplir con la siguiente restricción:

$$\omega_{Hm}^{29} + \omega_{Cn}^{29} + \omega_{HF}^{29} = 1 \quad (2.122)$$

## 2.4.2. Lixiviación ácida-caliente

### Tanque de Lixiviación (módulo 5)

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para el módulo 5, se expresan como:

**Balance de masa del hierro**

$$\omega_{HF}^{11} W_{11} \xi_{Fe}^{HF} + \omega_{Hm}^{11} W_{11} \xi_{Fe}^{Hm} + \rho_{SF}^{16} Q_{16} \xi_{Fe}^{SF} + \omega_{Hm}^{17} W_{17} \xi_{Fe}^{Hm} =$$

$$\rho_{SF}^{13} Q_{13} \xi_{Fe}^{SF} + \omega_{Hm}^{14} W_{14} \xi_{Fe}^{Hm}$$

**Balance de masa del zinc**

$$\omega_{Cn}^{11} W_{11} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{16} Q_{16} \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^{17} W_{17} \xi_{Zn}^{Cn} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_{12} \xi_{Zn}^{SZ} =$$

$$\rho_{SZ}^{13} Q_{13} \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^{14} W_{14} \xi_{Zn}^{Cn} \quad (2.124)$$

**Balance de masa del anión sulfato**

$$\rho_{SZ}^{16} Q_{16} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{16} Q_{16} \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SF}^{16} Q_{16} \xi_{SO}^{SF} + \rho_{SZ}^{Ea} Q_{12} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{Ea} Q_{12} \xi_{SO}^{AS} =$$

$$\rho_{SZ}^{13} Q_{13} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{13} Q_{13} \xi_{SO}^{AS} + \rho_{SF}^{13} Q_{13} \xi_{SO}^{SF} \quad (2.125)$$

**Balance de materia de la hematita** El balance de materia que relaciona la hematita residual con la que entra por medio del porcentaje de reacción o de conversión con las variables anteriores, se expresan como:

$$\omega_{Hm}^{14} W_{14} = (1 - \gamma_{Hm}) \cdot (\omega_{Hm}^{11} W_{11} + \omega_{Hm}^{17} W_{17}) \quad (2.126)$$

**Balance de materia de la zincita** Para la zincita, el balance de materia está dado por:

$$\omega_{Cn}^{14} W_{14} = (1 - \gamma_{Cn}) \cdot (\omega_{Cn}^{11} W_{11} + \omega_{Cn}^{17} W_{17}) \quad (2.127)$$

**Balance de materia global** El balance materia global para el módulo 5, se encuentra dado por:

$$\delta_{12} Q_{12} + \delta_{16} Q_{16} = \delta_{13} Q_{13} \quad (2.128)$$

donde  $\delta_{12}$ ,  $\delta_{13}$  y  $\delta_{16}$ , son las densidades de pulpa de las corrientes 12, 13 y 16. Los valores de estas densidades se obtienen a partir del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

**Restricción** Las fracciones másicas en la corriente 14 deben cumplir con la siguiente restricción:

$$\omega_{Cn}^{14} + \omega_{Hm}^{14} = 1 \quad (2.129)$$

**Tanque de Lixiviación (módulo 6)**

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para el módulo 6, se expresan como:

**Balance de materia del hierro**

$$\omega_{Hm}^{14} W_{14} \xi_{Fe}^{Hm} = \omega_{Hm}^{17} W_{17} \xi_{Fe}^{Hm} + \rho_{SF}^{16} Q_{16} \xi_{Fe}^{SF} \quad (2.130)$$

**Balance de materia del zinc**

$$\rho_{SZ}^{Ea} Q_{15} \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^{14} W_{14} \xi_{Zn}^{Cn} = \rho_{SZ}^{Ea} Q_{16} \xi_{Zn}^{SZ} + \omega_{Cn}^{17} W_{17} \xi_{Zn}^{Cn} \quad (2.131)$$

**Balance de materia del ión sulfato**

$$\rho_{SZ}^{Ea} Q_{15} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{Ea} Q_{15} \xi_{SO}^{AS} = \rho_{SZ}^{16} Q_{16} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{SF}^{16} Q_{16} \xi_{SO}^{SF} + \rho_{AS}^{16} Q_{16} \xi_{SO}^{AS} \quad (2.132)$$

**Balance de materia de la hematita** El balance de materia que relaciona la hematita residual con la que entra por medio del porcentaje de reacción o de conversión con las variables anteriores, se expresa como:

$$\omega_{Hm}^{17} W_{17} = (1 - \gamma_{Hm}) \cdot \omega_{Hm}^{14} W_{14} \quad (2.133)$$

**Balance de materia de la zincita** El balance de materia correspondiente para la zincita en función del porcentaje de reacción o de conversión, se encuentra dado por:

$$\omega_{Cn}^{17} W_{17} = (1 - \gamma_{Cn}) \cdot \omega_{Cn}^{14} W_{14} \quad (2.134)$$

**Balance de materia global** El balance masa global para el módulo 6, se expresa como:

$$\delta_{15} Q_{15} = \delta_{16} Q_{16} \quad (2.135)$$

donde  $\delta_{15}$  y  $\delta_{16}$  son las densidades de pulpa de las corrientes 15 y 16. Los valores de estas densidades se obtienen a partir del diagrama de flujo de la figura 2.1, de la página 10.

**Restricción** Las fracciones másicas en la corriente 17 deben cumplir con la siguiente restricción:

$$\omega_{Hm}^{17} + \omega_{Cn}^{17} = 1 \quad (2.136)$$

### 2.4.3. Despojo galvánico y piroconversión

Durante el proceso del despojo galvánico y la piroconversión, las variables involucradas son concentraciones másicas de iones. Por ejemplo, la concentración de sulfato férrico en la corriente 13,  $\rho_{SF}^{13}$ , será sustituida por  $\rho_{Fe^{3+}}^{A_1}$ . Este tipo de conversión se logra mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{Fe^{3+}}^{A_1} = \rho_{SF}^{13} \xi_{Fe}^{SF} \quad (2.137)$$

donde  $\xi_{Fe}^{SF}$  es la relación que existe entre hierro y el sulfato férrico. Por otro lado, los flujos volumínicos de acuoso se denotaran por una  $A$ , mientras que los flujos volumínicos de orgánico por una  $O$ .

Estos cambios se deben a que existe una notación bien definida para el proceso del despojo galvánico y la piroconversión.

#### Cargado (módulo 7)

Este módulo está constituido por tres etapas de cargado para garantizar la concentración de hierro requerido en la electrólisis, los cuales se expresan como:

- $C_1$  para la primera etapa de cargado,
- $C_2$  para la segunda etapa de cargado y
- $C_3$  para la tercera etapa de cargado.

Debe señalarse que el contacto acuoso-orgánico durante la etapa de cargado se puede considerar a flujo cruzado según se muestra en la figura 2.2, de la página 25.

La reacción química de cargado de hierro, se expresa como:



donde  $HA$  es el ácido di(2etilhexil) fosfórico y  $A^-$  es su anión.

#### Balances de materia para la primera etapa de cargado

##### Balance de masa del hierro

$$\rho_{Fe^{3+}}^{A_1} A_1 + \left(\frac{1}{3}\right) \rho_{Fe^{II}}^{O_2} O_2 = \rho_{Fe^{3+}}^{A_{12}} A_{12} + \rho_{Fe^{II}}^{O_4^{C_1}} O_4^{C_1} \quad (2.139)$$

**Balance de masa del anión sulfato**

$$\rho_{AS}^{A_1} A_1 \xi_{SO}^{AS} = \rho_{AS}^{A_{12}} A_{12} \xi_{SO}^{AS} \quad (2.140)$$

Por otro lado, la concentración de  $Fe^{III}$  en la corriente  $O_4$  está relacionada experimentalmente con la concentración de  $Fe^{3+}$  en la corriente  $A_3$ . Esta isoterma de extracción se expresa como:

$$\rho_{Fe^{III}}^{O_4^{C_1}} = f(\rho_{Fe^{3+}}^{A_{13}}) = -0.014 (\rho_{Fe^{3+}}^{A_{13}})^2 + 0.815 \rho_{Fe^{3+}}^{A_{13}} \quad (2.141)$$

**Balances de materia para la segunda etapa de cargado****Balance de masa del hierro**

$$\rho_{Fe^{3+}}^{A_{12}} A_{12} + \left(\frac{1}{3}\right) \rho_{Fe^{II}}^{O_2} O_2 = \rho_{Fe^{3+}}^{A_{23}} A_{23} + \rho_{Fe^{III}}^{O_4^{C_2}} O_4^{C_2} \quad (2.142)$$

**Balance de masa del anión sulfato**

$$\rho_{AS}^{A_{12}} A_{12} \xi_{SO}^{AS} = \rho_{AS}^{A_{23}} A_{23} \xi_{SO}^{AS} \quad (2.143)$$

Para la segunda etapa de cargado, se usa de nuevo la ecuación 2.141 que relaciona experimentalmente la concentración de  $Fe^{III}$  de la corriente  $O_4^{C_2}$  con la concentración de  $Fe^{3+}$  de la corriente  $A_{23}$ .

$$\rho_{Fe^{III}}^{O_4^{C_2}} = f(\rho_{Fe^{3+}}^{A_{23}}) = -0.014 (\rho_{Fe^{3+}}^{A_{23}})^2 + 0.815 \rho_{Fe^{3+}}^{A_{23}} \quad (2.144)$$

**Balances de materia para la tercera etapa de cargado****Balance de masa del hierro**

$$\rho_{Fe^{3+}}^{A_{23}} A_{23} + \left(\frac{1}{3}\right) \rho_{Fe^{II}}^{O_2} O_2 = \rho_{Fe^{3+}}^{A_3} A_3 + \rho_{Fe^{III}}^{O_4^{C_3}} O_4^{C_3} \quad (2.145)$$

**Balance de masa del anión sulfato**

$$\rho_{AS}^{A_{23}} A_{23} \xi_{SO}^{AS} = \rho_{AS}^{A_3} A_3 \xi_{SO}^{AS} \quad (2.146)$$

Al igual que en las etapas anteriores, hay una isoterma de extracción que relaciona la concentración  $Fe^{III}$  en la corriente  $O_4^{C_3}$  con la concentración de  $Fe^{3+}$  en la corriente  $A_3$ , dada por:

$$\rho_{Fe^{III}}^{O_4^{C_3}} = f(\rho_{Fe^{3+}}^{A_3}) = -0.014 (\rho_{Fe^{3+}}^{A_3})^2 + 0.815 \rho_{Fe^{3+}}^{A_3} \quad (2.147)$$

Debe señalarse que se ha elegido dividir la corriente orgánica ( $O_2$ ), en tres tercios antes de introducirla a cada una de las etapas de cargado.

**Restricciones** La ecuación que relaciona el flujo acuoso con el flujo orgánico en el cargado, se expresa como:

$$\left(\frac{A}{O}\right)_C = \frac{A_3}{O_4} \quad (2.148)$$

donde  $\left(\frac{A}{O}\right)_C$  es la relación de flujo en el cargado. Este valor corresponde con la línea de operación y se define según criterios de planta.

Por otro lado, el balance de flujo volumínico en la fase acuosa durante la etapa de cargado, se expresa como:

$$A_1 = A_{13} = A_{23} = A_3 \quad (2.149)$$

Además, de que los flujos volumínicos en las fases orgánicas deben cumplir con la siguiente restricción:

$$O_2 = O_4 \quad (2.150)$$

### Mezclador de corrientes (módulo 8)

Las corrientes orgánicas  $O_4^{C1}$ ,  $O_4^{C2}$  y  $O_4^{C3}$  se mezclan para formar una corriente resultante, la cual es introducida al despojo galvánico. Los balances de materia correspondientes son:

#### Balance de materia global

$$O_4^{C1} + O_4^{C2} + O_4^{C3} = O_4 \quad (2.151)$$

**Balance de materia por componentes** El balance de materia correspondiente para el hierro es:

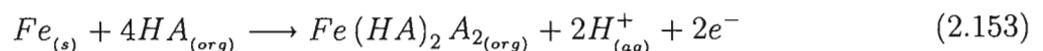
$$\rho_{Fe^{II}}^{O_4^{C1}} O_4^{C1} + \rho_{Fe^{II}}^{O_4^{C2}} O_4^{C2} + \rho_{Fe^{II}}^{O_4^{C3}} O_4^{C3} = \rho_{Fe^{II}}^{O_4} O_4 \quad (2.152)$$

donde  $\rho_{Fe^{II}}^{O_4}$  es la concentración  $Fe^{II}$  en la corriente resultante  $O_4$ .

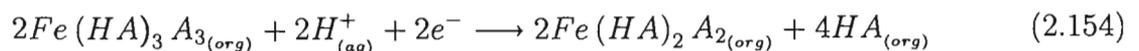
### Despojo galvánico (módulo 9)

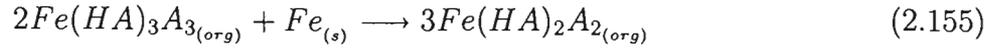
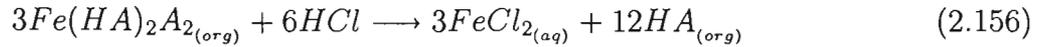
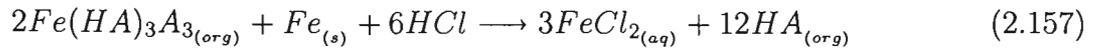
Las reacciones químicas que se pueden postular para la etapa del despojo galvánico utilizando hierro como elemento reductor, se presentan a continuación:

#### Semi-reacción anódica



#### Semi-reacción catódica



**Reducción del hierro****Transferencia de masa entre fases****Reacción global de despojo**

**Balance de materia por componentes** El balance de materia correspondiente para el hierro es:

$$\rho_{Fe^{III}}^{O_4} O_4 + S_{oFe} + \rho_{Fe^{2+}}^{A_9} A_9 = \rho_{Fe^{II}}^{O_2} O_2 + \rho_{Fe^{2+}}^{A_{10}} A_{10} \quad (2.158)$$

donde  $S_{oFe}$  es el flujo de hierro metálico que se consume como elemento reductor.

**Restricciones** Al igual que en el cargado, en el despojo galvánico se puede aplicar una línea de operación correspondiente con la relación entre el flujo acuoso y el flujo orgánico, la cual se expresa como:

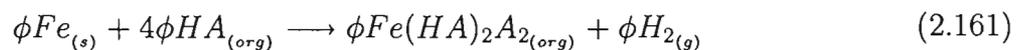
$$A_{10} = \left( \frac{A}{O} \right)_D \cdot O_2 \quad (2.159)$$

donde  $\left( \frac{A}{O} \right)_D$  es la relación de flujo en el despojo. Esta relación se fija de acuerdo a los criterios de planta.

La isoterma del despojo del hierro relaciona la concentración de  $Fe^{II}$  en la corriente  $O_2$  con la concentración de  $Fe^{3+}$  en la corriente  $A_{10}$ , la cual se encuentra dada por:

$$\rho_{Fe^{II}}^{O_2} = f(\rho_{Fe^{3+}}^{A_{10}}) = 0.001\rho_{Fe^{3+}}^{A_{10}} \quad (2.160)$$

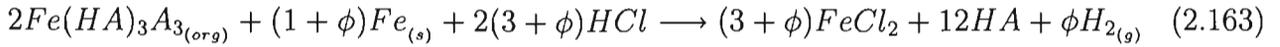
**Balance de hidrógeno y estequiometría del despojo galvánico** Por otro lado, para encontrar el flujo másico de hidrógeno gaseoso  $G_2$ , se requiere de la relación de moles entre el hierro que entra al despojo galvánico como elemento reductor y las moles de hidrógeno gaseoso. La reacción química paralela de  $\phi$  moles de hierro con el extractante, que producen evolución de hidrógeno, está dada por:



tomando en cuenta las  $\phi$  moles de hierro consumidas en exceso, la reacción subsecuente de despojo químico del hierro reaccionado, está dada por:



así, sumando las reacciones 2.161 , 2.162 y 2.157, se obtiene la reacción neta de despojo. Esta reacción, toma en cuenta la reacción parásita de producción de hidrógeno gaseoso durante la reducción del hierro en el orgánico con el consumo adicional del reductor.



Con la reacción 2.163, se obtiene la relación de moles de hierro metálico con las moles de hidrógeno gaseoso, es decir  $(1 + \phi)$  moles de hierro metálico producen  $\phi$  moles de hidrógeno gaseoso, lo cual se expresa como:

$$\frac{S_0}{M_{Fe}} = \frac{(1 + \phi)}{\phi} \left( \frac{G_2}{M_{H_2}} \right) \quad (2.164)$$

donde  $M_{Fe}$  es el peso molecular del hierro y  $M_{H_2}$  es el peso molecular del hidrógeno gaseoso.  $G_2$  es el flujo másico de hidrógeno gaseoso que se genera durante el despojo galvánico. Además, el valor de  $\phi$  está dado por:

$$\phi = \zeta - 1 \quad (2.165)$$

donde  $\zeta$  es el índice estequiométrico, el cual se define como la relación entre la cantidad de reductor metálico que se consume en el despojo y la cantidad estequiométrica de la reacción

$$\zeta_{Fe} = \frac{m_{Feconsumida}}{m_{Feestequimetrica}} \quad (2.166)$$

De esta manera se tiene un indicativo de la eficiencia de la reacción de reducción. Si la reducción consume una cantidad cercana a la estequiométrica, el índice estequiométrico se localiza cercano a la unidad. En cuanto el  $\zeta$  se aleja de la unidad, la cantidad de reductor consumida será mayor a la estequiométrica, por lo que el proceso será menos eficiente.

**Balance del anión D2EHPA (ácido di (2-etil hexil) fosfórico)** La concentración total del anión a la entrada de la etapa del despojo, se expresa como:

$$\rho_{A^-}^{O_2} = \rho_{FeII}^{O_2} \xi_{A^-}^{Fe} + \rho_{FeIII}^{O_2} \xi_{A^-}^{Fe} + \rho_{HA}^{O_2} \xi_{A^-}^{Fe} \quad (2.167)$$

donde  $\rho_{A^-}^{O_2}$  es la concentración total de  $A^-$  en la corriente  $O_2$ .

Similarmente la concentración total  $A^-$  en la corriente  $O_4$  a la salida del despojo galvánico se encuentra dada por la siguiente ecuación:

$$\rho_{A^-}^{O_4} = \rho_{FeII}^{O_4} \xi_{A^-}^{Fe} + \rho_{FeIII}^{O_4} \xi_{A^-}^{Fe} + \rho_{HA}^{O_4} \xi_{A^-}^{Fe} \quad (2.168)$$

Las concentraciones de  $\rho_{FeIII}^{O_2}$  y  $\rho_{FeII}^{O_4}$  se han observado en el rago de partes por millón cuando el proceso tiene una buena eficiencia. Bajo esta consideración estos términos se pueden despreciar, por lo que las expresiones de concentración total de  $A^-$  en las corrientes  $O_2$  y  $O_4$ , están dadas por:

En el cargado

$$\rho_{A^-}^{O_2} = \rho_{Fe^{II}}^{O_2} \xi_{A^-}^{Fe} + \rho_{HA}^{O_2} \xi_{A^-}^{Fe} \quad (2.169)$$

En el despojo galvánico

$$\rho_{A^-}^{O_4} = \rho_{Fe^{III}}^{O_4} \xi_{A^-}^{Fe} + \rho_{HA}^{O_4} \xi_{A^-}^{Fe} \quad (2.170)$$

**Divisor de corriente (módulo 10)**

**Balance de materia global**

$$A_{10} = A_{12} + A_{16} \quad (2.171)$$

Este balance debe cumplir con la siguiente restricción:

$$A_{12} = \alpha_{M_{10}} A_{10} \quad (2.172)$$

donde  $\alpha_{M_{10}}$  es el factor de separación del módulo 10.

**Restricciones** Debido a que se trata de un divisor de corriente, la concentración de  $Fe^{2+}$  se conserva en las corrientes de salida, es decir:

$$\rho_{Fe^{2+}}^{A_{10}} = \rho_{Fe^{2+}}^{A_{12}} = \rho_{Fe^{2+}}^{A_{16}} = \rho_{Fe^{2+}}^{dc} \quad (2.173)$$

donde  $\rho_{Fe^{2+}}^{dc}$  es la concentración de  $Fe^{2+}$  en el divisor de corriente

**Cristalización (módulo 11)**

El módulo 11 simula la precipitación de cristales de  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ , debido a la disminución de la temperatura. Los datos utilizados para simular este módulo se obtuvieron a partir del diagrama de fases del  $FeCl_2$  vs  $H_2O$ .

**Balance de masa del hierro** El balance correspondiente para el hierro, se expresa como:

$$\rho_{Fe^{2+}}^{dc} A_{12} = \rho_{Fe^{2+}}^{A_{15}} A_{15} + S_1 \xi_{Fe}^{CFT} \quad (2.174)$$

donde  $\rho_{Fe^{2+}}^{A_{15}}$  es la concentración de  $Fe^{2+}$  en la corriente  $A_{15}$ . Esta concentración se obtiene a partir del diagrama de fases para garantizar la precipitación de cristales de cloruro ferroso tetrahidratados a 20 °C.

**Balance de materia global.**

$$\delta_{A_{12}} A_{12} = \delta_{A_{15}} A_{15} + S_1 \quad (2.175)$$

donde  $\delta_{A_{12}}$  y  $\delta_{A_{15}}$  son las densidades de las corrientes  $A_{12}$  y  $A_{15}$  respectivamente. Los valores de estas densidades son las reportadas en la literatura a las concentraciones leídas en el diagrama de fases a las temperaturas respectivas.

**Mezclador de corrientes (módulo 12)**

Los balances de materia correspondientes para el módulo 12, se expresan como:

**Balance de masa global**

$$\delta_{15}A_{15} + \delta_{16}A_{16} = \delta_9A_9 \quad (2.176)$$

$\delta_9$  es la densidad de la corriente  $A_9$ . Para determinar el valor de esta densidad, se utilizó la siguiente ecuación empírica:

$$\frac{1}{\delta_9} = \frac{\left(\frac{A_{15}}{A_{15}+A_{16}}\right)}{\delta_{15}} + \frac{\left(\frac{A_{16}}{A_{15}+A_{16}}\right)}{\delta_{16}} \quad (2.177)$$

La ecuación 2.177, supone que los volúmenes son aditivos, lo cual difiere del valor real, ver referencia [Felder (1999)].

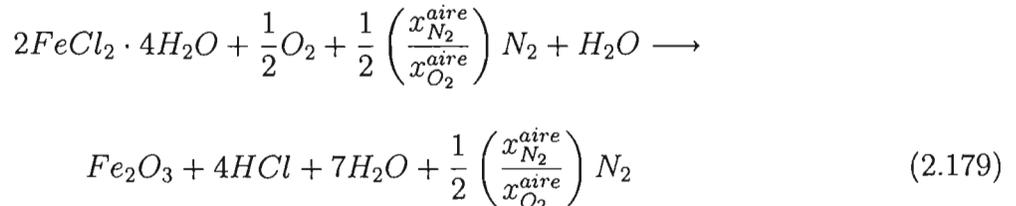
**Balance de materia del hierro**

$$\rho_{Fe^{2+}}^{A_{15}} A_{15} + \rho_{Fe^{2+}}^{dc} A_{16} = \rho_{Fe^{2+}}^{A_9} A_9 \quad (2.178)$$

**Piroconversión (módulo 13)**

Esta etapa es fundamental para proceso de implantación del despojo galvánico y la piroconversión, ya que se lleva acabo la transformación de los cristales de cloruro ferroso a hematita. En esta etapa es necesario establecer los balances correspondientes a cada una de las especies involucradas para garantizar la conservación de la materia en todo el proceso.

La reacción química de desplazamiento que ocurre en la piroconversión, esta dada por:



esta reacción satisface la oxidación del hierro y la reducción del oxígeno, donde  $x_{N_2}^{aire}$  es la fracción de nitrógeno en el aire y  $x_{O_2}^{aire}$  es la fracción de oxígeno en el aire.

**Balances de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes a este módulo, se expresan como:

**Balance de materia del hierro**

$$S_{1_{CFT}} \xi_{Fe}^{CFT} = S_{2_{Hm}} \xi_{Fe}^{Hm} \quad (2.180)$$

donde  $S_{2_{Hm}}$  es el flujo másico de hematita.

**Balance de materia del hidrógeno**

$$S_{1_{CFT}} \xi_H^{CFT} + A_{18} \xi_H^{HO} = G_1 y_{HCl(g)} M_{HCl(g)} \xi_H^{HCl(g)} + G_1 y_{H_2O(g)} M_{H_2O(g)} \xi_H^{HO(g)} \quad (2.181)$$

donde  $G_1$  es flujo molar de la mezcla de gases después de la piroconversión,  $y_{HCl(g)}$  y  $y_{H_2O(g)}$  son las fracciones molares de cloruro de hidrógeno y vapor de agua respectivamente.  $M_{HCl(g)}$  y  $M_{H_2O(g)}$  son los pesos moleculares del cloruro de hidrógeno y del vapor de agua.

**Balance de materia del oxígeno**

$$G_o x_{O_2}^{aire} M_{O_2} + A_{18} \xi_O^{HO} = S_{2_{Hm}} \xi_O^{Hm} \quad (2.182)$$

**Balance de materia del cloruro**

$$S_{1_{Hm}} \xi_{Cl}^{CFT} = G_1 y_{HCl(g)} M_{HCl(g)} \xi_{Cl}^{HCl(g)} \quad (2.183)$$

**Restricciones generales utilizando hierro como reductor**

Existen restricciones generales del proceso de implantación del despojo galvánico y la piroconversión que deben cumplirse para garantizar la validación de los resultados.

**Balance global de hidrógeno** Este balance de materia es importante porque a partir de él se puede controlar la cantidad de agua requerida para equilibrar el hidrógeno gaseoso que se produce durante el despojo galvánico, el cual se expresa como:

$$\left( \rho_{AS}^{A_1} A_1 \xi_H^{AS} \right)_C + \left( (A_{18} + A_{19}) \xi_H^{HO} \right)_P = \left( \rho_{AS}^{A_3} A_3 \xi_H^{AS} \right)_C + \left( G_{2_{H_2}} \right)_D \quad (2.184)$$

donde  $A_{18}$  y  $A_{19}$  son flujos volumínicos de agua y  $G_2$  es el flujo másico de hidrógeno gaseoso.

**Balance global de hierro, en kg-mol de hierro.** Existe un balance masa global de hierro que relaciona todas las etapas de proceso del despojo galvánico y la piroconversión.

$$\left( \frac{\rho_{Fe^{3+}}^{A_1} A_1}{M_{Fe}} \right)_C + \left( \frac{S_{0_{Fe}}}{M_{Fe}} \right)_D = \left( \frac{S_{2_{Hm}} \xi_{Fe}^{Hm}}{M_{Fe}} \right)_P + \left( \frac{\rho_{Fe^{3+}}^{A_3} A_3}{M_{Fe}} \right)_C \quad (2.185)$$

**Electrólisis****Celda electrolítica (módulo 14)**

**Balance de materia por componentes** Los balances de materia correspondientes para este módulo, se expresan como:

**Balance de masa del zinc**

$$\rho_{SZ}^{10} Q_{10} \xi_{Zn}^{SZ} = \rho_{SZ}^{Ea} \xi_{Zn}^{SZ} \cdot (Q_4 + Q_9 + Q_{12} + Q_{15}) + W_{31_{Zn}} \quad (2.186)$$

Balance de masa del ión sulfato

$$\rho_{SZ}^{10} Q_{10} \xi_{SO}^{SZ} = (\rho_{SZ}^{Ea} \xi_{SO}^{SZ} + \rho_{AS}^{Ea} \xi_{SO}^{AS}) \cdot (Q_4 + Q_9 + Q_{12} + Q_{15}) \tag{2.187}$$

Balance de masa global El balance de masa par el módulo 13, se expresa como:

$$\delta_{10} Q_{10} = \delta_{Ea} (Q_4 + Q_9 + Q_{12} + Q_{15}) \tag{2.188}$$

### 2.5. Proceso modificado con zinc como reductor

Para esta variante el número de módulos, así como el diagrama de flujo en general, no se ven alterados por el cambio en el tipo de reductor. Por otro lado, la formulación de los balances de materia correspondientes a los módulos del 1 al 6 y el módulo concerniente a la piroconversión de la figura 2.3, de la página 40, son los mismos empleados en la versión anterior. Sin embargo, las etapas de cargado, despojo y cristalización se ven afectadas por el tipo de reductor utilizado. Por lo tanto se requiere hacer la formulación correspondiente a los balances de materia del zinc en cada una de las etapas involucradas en el despojo galvánico y la piroconversión.

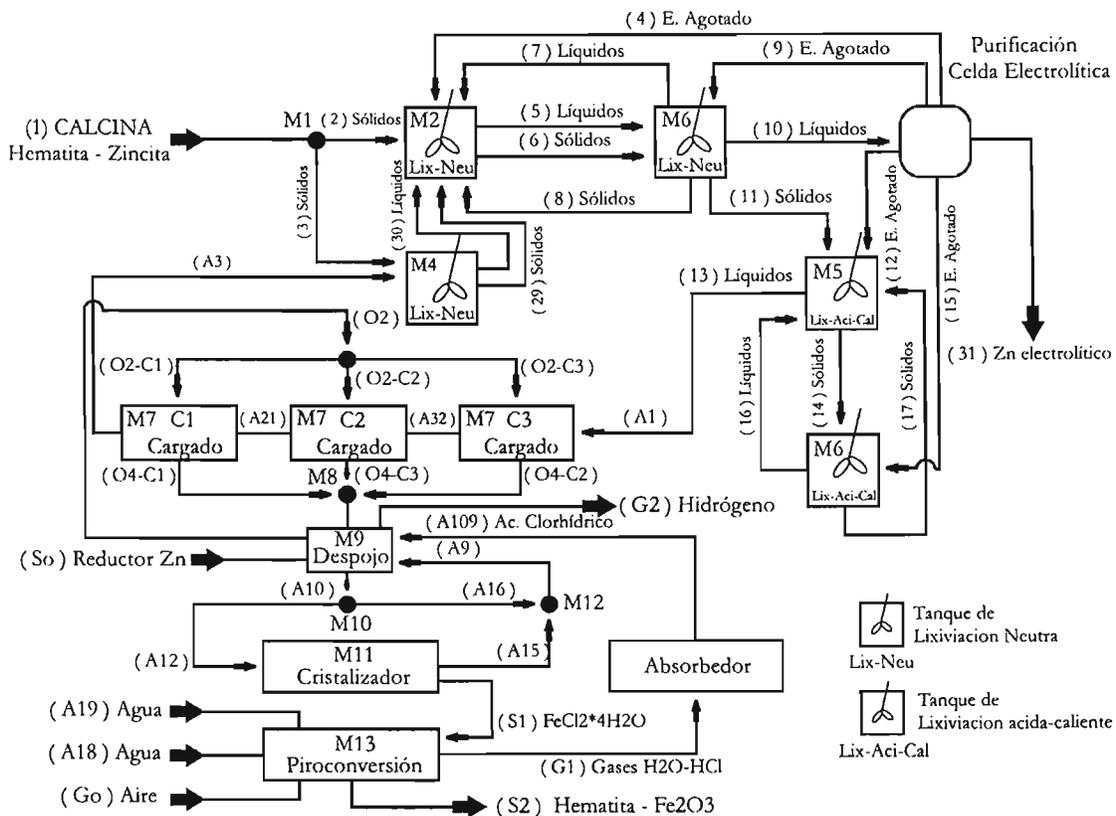


Figura 2.3: Diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor.

### 2.5.1. Despojo galvánico y piroconversión

#### Cargado (módulo 7)

Al igual que en la etapa de cargado utilizando hierro como elemento reductor, se propusieron tres etapas de cargado para garantizar la concentración de hierro requerida para el despojo galvánico, para lo cual se utilizó la misma notación para diferenciar las tres etapas de cargado.

Las reacciones químicas que ocurren en esta etapa, se presentan a continuación:

Reacción química en el cargado de hierro:



Despojo de zinc en el cargado de hierro:



#### Balances de materia de la primera etapa de cargado

##### Balance de materia del zinc

$$\rho_{SZ}^{A_1} A_1 \xi_{Zn}^{SZ} + \frac{1}{3} \rho_{ZnII}^{O_2} O_2 = \rho_{Zn^{2+}}^{A_{21}} A_{21} + \rho_{ZnII}^{O_4^{C_1}} O_4^{C_1} \quad (2.191)$$

Por otro lado, la concentración de  $Zn^{II}$  en la corriente  $O_4^{C_1}$  se relaciona experimentalmente con la concentración de  $Zn^{2+}$  en la corriente  $A_3$ , mediante la isoterma de despojo durante el cargado del hierro:

$$\rho_{ZnII}^{O_4^{C_1}} = f(\rho_{Zn^{2+}}^{A_{12}}) = 0.001 \rho_{Zn^{2+}}^{A_{12}} \quad (2.192)$$

#### Balances de materia de la segunda etapa de cargado

##### Balance de materia del zinc

$$\rho_{Zn^{2+}}^{A_{21}} A_{21} + \frac{1}{3} \rho_{ZnII}^{O_2} O_2 = \rho_{Zn^{2+}}^{A_{32}} A_{32} + \rho_{ZnII}^{O_4^{C_2}} O_4^{C_2} \quad (2.193)$$

Para la segunda etapa de cargado, existe una expresión similar a la ecuación 2.192 que relaciona experimentalmente la concentración de  $Zn^{II}$  de la corriente  $O_4^{C_2}$  con la concentración de  $Zn^{2+}$  de la corriente  $A_{23}$ .

$$\rho_{ZnII}^{O_4^{C_2}} = f(\rho_{Zn^{2+}}^{A_{23}}) = 0.001 \rho_{Zn^{2+}}^{A_{23}} \quad (2.194)$$

#### Balances de materia de la tercera etapa de cargado

**Balance de materia del zinc**

$$\rho_{Zn^{2+}}^{A_{32}} A_{32} + \frac{1}{3} \rho_{Zn^{II}}^{O_2} O_2 = \rho_{Zn^{2+}}^{A_3} A_3 + \rho_{Zn^{II}}^{O_4^{C_3}} O_4^{C_3} \quad (2.195)$$

Al igual que en las etapas anteriores, hay una relación experimental para la concentración  $Zn^{II}$  en la corriente  $O_4^{C_3}$  con la concentración de  $Zn^{2+}$  en la corriente  $A_3$ .

$$\rho_{Zn^{II}}^{O_4^{C_3}} = f(\rho_{Zn^{2+}}^{A_3}) = 0.001 \rho_{Zn^{2+}}^{A_3} \quad (2.196)$$

Los balance de materia correspondientes para el hierro y el anión sulfato son los mismos mostrados en las ecuaciones 2.139, 2.142, 2.145, 2.140, 2.143 y 2.146, de la página 32.

**Restricciones** Las isotermas empíricas del hierro son las mismas en el proceso de implantación del despojo galvánico utilizando zinc como elemento reductor, al igual que la relación entre el flujo de acuoso y flujo orgánico, ver ecuaciones 2.148, 2.141, 2.144 y 2.147, de la página 34.

**Mezclador de corrientes (módulo 8)**

El balance de materia global para este módulo es el mismo utilizado en el proceso anterior, ver ecuación 2.151, de la página 34.

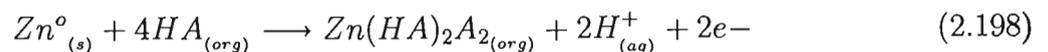
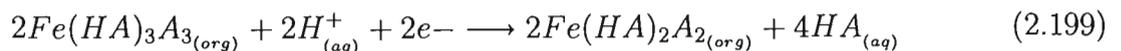
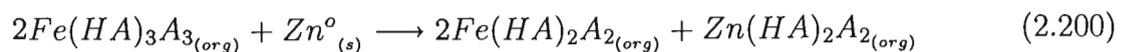
**Balance de masa del zinc** El balance de masa correspondiente para este módulo, se expresa como:

$$\rho_{Zn^{II}}^{O_4^{C_1}} O_4^{C_1} + \rho_{Zn^{II}}^{O_4^{C_2}} O_4^{C_2} + \rho_{Zn^{II}}^{O_4^{C_3}} O_4^{C_3} = \rho_{Zn^{II}}^{O_4} O_4 \quad (2.197)$$

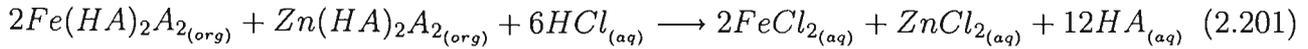
El balance de masa del hierro para este módulo es el mismo utilizado en el proceso anterior, ver ecuación 2.152, de la página 34.

**Despojo galvánico (módulo 9)**

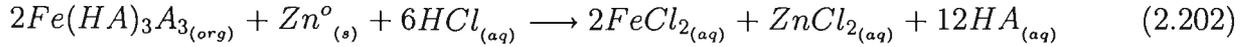
Las reacciones químicas que ocurren en el despojo galvánico, utilizando zinc como elemento reductor, se presentan a continuación:

**Semi-reacción anódica****Semi-reacción catódica****Reducción del hierro**

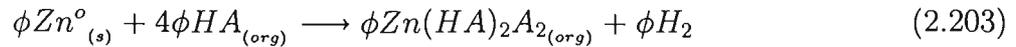
**Despojo químico o transferencia de masa entre fases**



**Reacción neta de despojo**

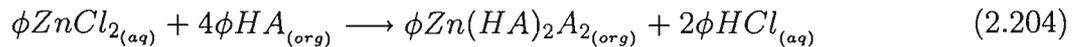


**Evolución de hidrógeno en el despojo galvánico** La reacción química paralela de  $\phi$  moles de Zn con el extractante, produciendo la evolución del hidrógeno, está dada por:

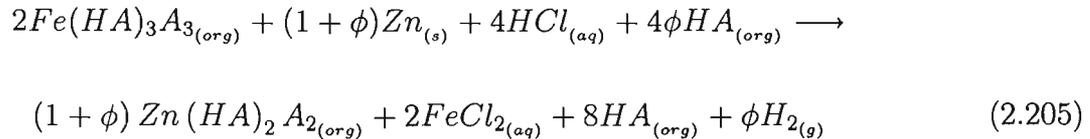


Se debe de tomar en cuenta, que la concentración de zinc en el orgánico en comparación con el acuoso es mucho mayor, debido a que el pH de despojo es elevado. Esto ocasiona que el zinc se mantenga en el orgánico de acuerdo al equilibrio. Por lo tanto la concentración de zinc en la fase acuosa es muy pequeña y está en función del pH.

Es decir, su reacción química de cargado durante el despojo, se expresa como:



Por lo tanto la reacción global de despojo del hierro en presencia del zinc como reductor es:



esta ecuación se obtiene por medio de la adición de las ecuaciones 2.202, 2.203 y 2.204.

**Balance de masa del zinc** Los balances de masa correspondiente para este módulo, se expresan como:

$$S_{0Zn} + \rho_{Zn^{II}}^{O_4} O_4 + \rho_{Zn^{2+}}^{A_9} A_9 = \rho_{Zn^{II}}^{O_2} O_2 + \rho_{Zn^{2+}}^{dc} A_{10} \quad (2.206)$$

donde  $S_{0Zn}$  es el flujo másico del zinc metálico usado como reductor.

El balance de masa correspondiente para el hierro se da por medio de la ecuación 2.158, de la página 35.

**Restricciones** La ecuación que relaciona el flujo volumínico de la fase acuosa con el flujo volumínico de la fase orgánica, la línea de operación es la misma utilizada para la versión anterior, ver la ecuación 2.159, de la página 35.

La isoterma del cargado del zinc durante el despojo del hierro relaciona la concentración de  $Zn^{II}$  en la corriente  $O_2$  se relaciona experimentalmente con la concentración de  $Zn^{2+}$  en la corriente  $A_{10}$ , por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho_{Zn^{II}}^{O_2} = -0.8364 (\rho_{Zn^{2+}}^{A_{10}})^2 + 1.4672 \rho_{Zn^{2+}}^{A_{10}} + 6.8641 \rho_{Zn^{2+}}^{A_{10}} \quad (2.207)$$

La isoterma de despojo del hierro utilizando zinc como reductor, es la misma presentada en el proceso anterior, ver la ecuación 2.160, de la página 35.

Para encontrar el flujo de hidrógeno gaseoso producido ( $G_2$ ), se requiere de la relación de moles entre el zinc que entra al despojo galvánico como reductor y las moles de hidrógeno gaseoso en la salida. Utilizando la reacción 2.205, de la página 43, se puede obtener la relación de moles de zinc metálico con las moles de hidrógeno gaseoso, es decir,  $(1 + \phi)$  moles de zinc metálico producen  $\phi$  moles de hidrógeno gaseoso, lo cual se expresa como:

$$\frac{S_0}{M_{Zn}} = \frac{(1 + \phi)}{\phi} \left( \frac{G_2}{M_{H_2}} \right) \quad (2.208)$$

Donde también se tiene que:

$$\zeta_{Zn} = 1 + \phi \quad (2.209)$$

### Divisor de corrientes (módulo 10)

El balance de materia global y sus restricciones son las mismas utilizadas en el proceso anterior, véase la ecuación 2.171 y 2.172, de la página 37.

**Restricciones** Por otro lado, la concentración de cloruro de zinc en el módulo 10 es una sola, debido a que se trata de un divisor de corriente, es decir:

$$\rho_{Zn^{2+}}^{A_{10}} = \rho_{Zn^{2+}}^{A_{12}} = \rho_{Zn^{2+}}^{A_{16}} = \rho_{Zn^{2+}}^{dc} \quad (2.210)$$

### Cristalización (módulo 11)

Este módulo en comparación con el anterior, tiene que el zinc no alcanza su punto de saturación, lo que provoca que no precipite. Por lo tanto, todo el cloruro de zinc es introducido a la corriente  $A_{15}$ .

**Balance de materia por componentes** El balance correspondiente para el zinc esta dado por:

$$\rho_{Zn^{2+}}^{dc} A_{12} = \rho_{Zn^{2+}}^{A_{15}} A_{15} \quad (2.211)$$

El balance de masa del hierro para este módulo, es el mismo utilizado en el proceso anterior, ver la ecuación 2.173, de la página 37.

### Mezclador de corrientes (módulo 12)

El balance de materia global y la restricción referida a la corriente  $A_9$ , se presentan en las ecuaciones 2.176 y 2.177, de la página 38 y son las que se aplican aquí.

**Balance de materia por componentes** El balance de materia correspondiente para el zinc, se expresa como:

$$\rho_{Zn^{2+}}^{A_{15}} A_{15} + \rho_{Zn^{2+}}^{dc} A_{16} = \rho_{Zn^{2+}}^{A_9} A_9 \quad (2.212)$$

### Restricciones generales utilizando zinc como reductor

Una forma práctica de verificar la certeza del modelo es cuantificando la cantidad de entrada y salida de cada una de las especies involucradas. Esto se logra realizando los balances de materia globales para el hierro y el zinc, los cuales se expresan como:

**Balance de materia global de hierro, en g-mol de hierro.**

$$\left( \frac{\rho_{Fe^{3+}}^{A_1} A_1}{M_{Fe}} \right)_C = \left( \frac{S_{2Hm} \xi_{Fe}^{Hm}}{M_{Fe}} \right)_P + \left( \frac{\rho_{Fe^{3+}}^{A_3} A_3}{M_{Fe}} \right)_C \quad (2.213)$$

**Balance de materia global de zinc, en g-mol de zinc.**

$$\left( \frac{\rho_{Zn^{2+}}^{A_1} A_1}{M_{Zn}} \right)_C + \left( \frac{S_{0Zn}}{M_{Zn}} \right)_D = \left( \frac{\rho_{Zn^{2+}}^{A_3} A_3}{M_{Zn}} \right)_C \quad (2.214)$$

**Balance de masa global del hidrógeno**

$$\left( \rho_{AS}^{A_1} A_1 \xi_H^{AS} \right)_C + \left( (A_{18} + A_{19}) \xi_H^{H_2O} \right)_P = \left( \rho_{AS}^{A_3} A_3 \xi_H^{AS} \right)_C + \left( G_{2H_2} \right)_D \quad (2.215)$$

Estos balances toman en cuenta cada una de las etapas involucradas en el proceso de implantación del despojo galvánico y la piroconversión.

## 2.6. Método de solución

Todos los balances de materia establecidos así como sus restricciones constituyen un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales. Para el proceso hidrometalúrgico convencional se generó un sistema de 73 ecuaciones simultaneas. Para el proceso hidrometalúrgico con modificación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor se obtuvo un sistema de 83 ecuaciones y para el proceso de implantación utilizando zinc como elemento reductor se planteó un sistema de 93 ecuaciones.

Para obtener tanto los flujos como las concentraciones planteadas como incógnitas, el sistema de ecuaciones debe solucionarse, por lo que se requiere un método de solución adecuado. El método de solución debe garantizar la convergencia hacia la solución, por lo que se requiere que cumpla con esta característica específica. Además de esta característica, el método numérico tiene que ser fácil de codificar.

Existe una gran variedad de métodos numéricos que ofrecen solución a sistemas algebraicos no lineales. Entre los cuales se tiene el método de Broyden, el de la secante, los quasi-newtonianos

y el de Newton Raphson. Cada uno de estos métodos numéricos tiene ventajas y desventajas. Para resolver el sistema planteado en este caso, se seleccionó el método de Newton Raphson. La principal ventaja de este método es su convergencia cuadrática y su principal desventaja es que no se autocorrije; es decir, se requiere de estimados iniciales muy cercanos a la raíces de la solución.

Una vez seleccionado el método numérico se prosigue a la búsqueda de un lenguaje de programación que permita codificar dicho algoritmo. Este lenguaje debe cumplir con las necesidades planteadas por el método numérico. En el caso del método de Newton Raphson se requiere de un lenguaje de programación con una buena respuesta al cálculo de operaciones algebraicas. Algunos de los principales lenguajes de programación son: Basic, Pascal, Turbo Pascal, C, C++, Visual Basic, Mathematica, Math-lab, Maple, etc. Después de analizar las posibilidades de utilizar alguno de estos programas, se escogió el paquete de programación Maple versión 8.0 fabricado por Waterloo Maple, este paquete de software se encuentra bajo licencia de la Facultad de Química. La elección de este programa se debe a su capacidad de realizar operaciones de algebra lineal, como es la suma, la resta, la multiplicación, etc., ya que uno de los grandes problemas al codificar el método de Newton Raphson es la determinación de la matriz jacobiana. Esta matriz se debe de recalcularse en cada iteración, lo que hace que el método se dificulte en otros lenguajes de programación. Sin embargo, ese no es problema al utilizar la paquetería de Maple.

Una vez codificado el método numérico se requiere su validación. La validación se efectuó realizando un problema reportado en [Burden (2004)]. Los resultados se comparan entre sí para ver el desempeño del lenguaje de programación y el algoritmo.

Después de que se validó el método numérico, se prosigió a la creación del modelo matemático para cada una de las versiones del proceso:

1. Proceso hidrometalúrgico convencional
2. Proceso hidrometalúrgico modificado con el despojo galvánico y la piroconversión, utilizando hierro como reductor
3. Proceso hidrometalúrgico modificado con el despojo galvánico y la piroconversión, utilizando zinc como reductor

Los resultados se obtuvieron a partir de resolver más de una vez cada uno de los sistemas de ecuaciones. Para cada solución se propuso una serie de condiciones de operación. Entre estas condiciones se tiene el contenido de hierro en la calcina, el índice estequiométrico del hierro y del zinc, las relaciones acuoso-orgánico tanto en el cargado como en el despojo, la concentración de ácido sulfúrico en el electrolito agotado así como la concentración de sulfato de zinc. Estas condiciones se fijaron a partir de diversos criterios de experimentación y de valores reportados en la bibliografía. Es decir, el índice estequiométrico del hierro y del zinc se fijó a partir de los resultados experimentales reportados en [Barrera (2002)] y [Barrera (2000)], siendo de 2.70 para el hierro y de 1.70 para el zinc, estos valores son los más representativos de cada uno de los índices estequiométricos. En el caso de las relaciones acuoso-orgánico, también son valores que representan las condiciones más eficientes de operación durante la experimentación. Para la relación acuoso-orgánico en el cargado  $\left(\frac{A}{O}\right)_C$  se tiene el valor de 0.75 mientras que

para la relación acuoso-orgánico en el despojo  $\left(\frac{A}{O}\right)_D$  es de 2.00. Las concentraciones de ácido sulfúrico y de sulfato de zinc son valores representativos de varias plantas de extracción de zinc vía hidrometalurgia reportados en [James (2000)]. Al igual que las concentraciones de ácido sulfúrico y de sulfato zinc, el valor del contenido de hierro en la calcina representa la media de los resultados publicados en [James (2000)].

Los resultados se obtuvieron a partir de considerar una base de cálculo de una tonelada de zinc metálico. Esto se debe a que generalmente los resultados así como las condiciones de operación se reportan por tonelada de zinc.

Cada modelo matemático debe de ser validado por medio de la coherencia de los resultados obtenidos, evidente al comprobarse el debido cumplimiento de los balances de materia propuestos para cada uno de los módulos. Estos resultados se presentan en tablas que indican las cantidades de cada compuesto que entra a cada módulo así como las cantidades de salida. Además, se muestran las concentraciones, las fracciones másicas y los flujos tanto volumínicos como másicos.

Para todos los módulos de cada proceso se construyó además una tabla de control con la finalidad de observar el comportamiento del sistema y verificar su sensibilidad a los datos de operación. A partir de este tipo de análisis se puede verificar la congruencia de los balances de materia y validar así cada modelo matemático.

## 2.7. Condiciones de operación

Las condiciones de operación, como son las fracciones estequiométricas, las densidades de los compuestos y de las corrientes de pulpa, al igual que los pesos moleculares y las concentraciones utilizadas en el método de solución, se muestran a continuación:

N o t a c i ó n		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
$FH$	$\xi_{Fe}^{Hm}$	Contenido de $Fe$ en la hematita	0.699433	----
$OH$	$\xi_O^{Hm}$	Contenido de $O$ en la hematita	$1 - FH$	----
$ZZ$	$\xi_{Zn}^{Cn}$	Contenido de $Zn$ en la zincita	0.803373	----
$FHF$	$\xi_{Fe}^{HF}$	Contenido de $Fe$ en el hidróxido férrico	0.522573	----
$ZSZ$	$\xi_{Zn}^{SZ}$	Contenido de $Zn$ en el sulfato de zinc	0.404939	----

Tabla 2.5: Fracciones estequiométricas

N o t a c i ó n		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
<i>FSF</i>	$\xi_{Fe}^{SF}$	Contenido de <i>Fe</i> en el sulfato férrico	0.279319	-----
<i>SAS</i>	$\xi_{SO}^{AS}$	Cont. del anión sulfato en el ac. sulfúrico	0.979445	-----
<i>SSZ</i>	$\xi_{SO}^{SZ}$	Cont. del anión sulfato en el sulf. de zinc	0.595060	-----
<i>SSF</i>	$\xi_{SO}^{SF}$	Cont. del anión sulfato en el sulf. férrico	0.720680	-----
<i>HAS</i>	$\xi_H^{AS}$	Contenido de <i>H</i> en el ac. sulfúrico	0.020554	-----

Tabla 2.6: Fracciones estequiométricas (continuación)

N o t a c i ó n		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
<i>ZZII</i>	$\xi_{Zn}^{ZII}$	Contenido de <i>Zn</i> en $Zn(HA)_2 A_2$	0.048312	-----
<i>FFII</i>	$\xi_{Fe}^{FII}$	Contenido de <i>Fe</i> en $Fe(HA)_2 A_2$	0.041566	-----
<i>FFIII</i>	$\xi_{Fe}^{FIII}$	Contenido de <i>Fe</i> en $Fe(HA)_3 A_3$	0.028100	-----
<i>HHCl</i>	$\xi_H^{HCl}$	Contenido de <i>H</i> en ac. clorhídrico	0.027645	-----
<i>HHO</i>	$\xi_H^{HO}$	Contenido de <i>H</i> en agua	0.111901	-----

Tabla 2.7: Fracciones estequiométricas (continuación)

N o t a c i ó n		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
<i>OHO</i>	$\xi_O^{HO}$	Contenido de <i>O</i> en agua	0.888098	-----
<i>CHCl</i>	$\xi_{Cl}^{HCl}$	Contenido de <i>Cl</i> en ac. clorhídrico	0.972354	-----
<i>CCF</i>	$\xi_{Cl}^{CF}$	Contenido de <i>Cl</i> en cloruro ferroso	0.559402	-----
<i>FCF</i>	$\xi_{Fe}^{CF}$	Contenido de <i>Fe</i> en cloruro ferroso	0.440597	-----
<i>FCFT</i>	$\xi_{Fe}^{CFT}$	Cont. de <i>Fe</i> en clor. ferroso tetrahidratado	0.280900	-----

Tabla 2.8: Fracciones estequiométricas (continuación)

N o t a c i ó n		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
<i>HOCFT</i>	$\xi_{HO}^{CFT}$	Cont. $H_2O$ en clor. ferros tetrahidratado	0.362455	-----
<i>HCFT</i>	$\xi_H^{CFT}$	Cont. de <i>H</i> en clor. ferroso tetrahidratado	0.040559	-----
<i>CCFT</i>	$\xi_{Cl}^{CF}$	Cont. de <i>Cl</i> en clor. ferroso tetrahidratado	0.356644	-----
<i>FJ</i>	$\xi_{Fe}^J$	Contenido de <i>Fe</i> en jarosita	0.349227	-----
<i>SJ</i>	$\xi_{SO}^J$	Cont. del anión sulfato en jarosita	0.400467	-----

Tabla 2.9: Fracciones estequiométricas (continuación)

Notación		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
$XOA$	$X_O^{aire}$	Fracción de oxígeno en el aire	0.21	----
$XNA$	$X_N^{aire}$	Fracción de nitrógeno en el aire	0.79	----
$ZCZ$	$\xi_{Zn}^{CZ}$	Contenido de $Zn$ en el cloruro de zinc	0.479688	----
$CCZ$	$\xi_{Cl}^{CZ}$	Contenido de $Cl$ en el cloruro de zinc	0.520311	----

Tabla 2.10: Fracciones estequiométricas (continuación)

Notación		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
$PMOG$	$M_{O_2}$	Peso molecular del oxígeno gaseoso	31.9988	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMNG$	$M_{N_2}$	Peso molecular del nitrógeno gaseoso	28.0134	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMF$	$M_{Fe}$	Peso molecular del hierro	55.8470	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMZn$	$M_{Zn}$	Peso molecular del zinc	65.3700	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMHCl$	$M_{HCl}$	Peso molecular del ac. clorhídrico	36.4609	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$

Tabla 2.11: Pesos moleculares

Notación		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
$PMh$	$M_{H_2}$	Peso molecular del hidrógeno gaseoso	2.01594	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMHO$	$M_{HO}$	Peso molecular del agua	18.0153	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMAS$	$M_{AS}$	Peso molecular del ácido sulfúrico	98.0775	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMSZ$	$M_{SZ}$	Peso molecular del sulfato de zinc	161.431	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMZ$	$M_{Cn}$	Peso molecular de la zincita	81.3694	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$

Tabla 2.12: Pesos moleculares (continuación)

Notación		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
$PMHF$	$M_{HF}$	Peso molecular del hidróxido férrico	106.869	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMH$	$M_{Hm}$	Peso molecular de la hematita	159.692	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMSF$	$M_{SF}$	Peso molecular del sulfato férrico	399.878	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMCF$	$M_{CF}$	Peso molecular del cloruro ferroso	126.753	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMCFE$	$M_{CFE}$	Peso mol. de clor. ferroso tetrahidratado	198.814	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$
$PMCZ$	$M_{CZ}$	Peso molecular del cloruro de zinc	136.276	$\frac{kg}{kg \cdot mol}$

Tabla 2.13: Pesos moleculares (continuación)

N o t a c i ó n		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
$DA3$	$\delta_{A_3}$	Densidad de la corriente $A_3$	1310.0	$\frac{kg}{m^3}$
$DA12$	$\delta_{A_{12}}$	Densidad de la corriente $A_{12}$	1388.0	$\frac{kg}{m^3}$
$DA15$	$\delta_{A_{15}}$	Densidad de la corriente $A_{15}$	1443.0	$\frac{kg}{m^3}$
$DAO2$	$\delta_{O_2}$	Densidad de la corriente $O_2$	285.6	$\frac{kg}{m^3}$
$DAO4$	$\delta_{O_4}$	Densidad de la corriente $O_4$	285.6	$\frac{kg}{m^3}$
$D4$	$\delta_4$	Densidad de la corriente 4	1270.0	$\frac{kg}{m^3}$
$D5$	$\delta_5$	Densidad de la corriente 5	1420.0	$\frac{kg}{m^3}$
$D7$	$\delta_7$	Densidad de la corriente 7	1440.0	$\frac{kg}{m^3}$
$D9$	$\delta_9$	Densidad de la corriente 9	1270.0	$\frac{kg}{m^3}$

Tabla 2.14: Densidades de compuestos y corrientes

N o t a c i ó n		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
$D10$	$\delta_{10}$	Densidad de la corriente 10	1420.0	$\frac{kg}{m^3}$
$D12$	$\delta_{12}$	Densidad de la corriente 12	1270.0	$\frac{kg}{m^3}$
$D13$	$\delta_{13}$	Densidad de la corriente 13	1310.0	$\frac{kg}{m^3}$
$D15$	$\delta_{15}$	Densidad de la corriente 15	1270.0	$\frac{kg}{m^3}$
$D16$	$\delta_{16}$	Densidad de la corriente 16	1310.0	$\frac{kg}{m^3}$
$D30$	$\delta_{30}$	Densidad de la corriente 30	1430.0	$\frac{kg}{m^3}$
$DAS$	$\delta_{AS}$	Densidad del ac. sulfúrico	1768.0	$\frac{kg}{m^3}$
$DAM$	$\delta_{Am}$	Densidad del amoniaco	678.7	$\frac{kg}{m^3}$

Tabla 2.15: Densidades de compuestos y corrientes (continuación)

N o t a c i ó n		Significado	Valor	Unidad
Maple	Modelo			
$CSZEA$	$\rho_{SZ}^{EA}$	Conc. másica del sulf. de zinc en elec. agotado	150.00	$\frac{kg}{m^3}$
$CASEA$	$\rho_{AS}^{EA}$	Conc, másica del ac. sulfúrico en elec. agotado	49.03	$\frac{kg}{m^3}$
$DDC$	$(\rho_{Fe^{2+}})_C$	Conc. másica del $Fe^{2+}$ en el despojo	244.62	$\frac{kg}{m^3}$
$CDD$	$(\rho_{Fe^{2+}})_D$	Conc. másica del $Fe^{2+}$ en el cargado	244.39	$\frac{kg}{m^3}$

Tabla 2.16: Concentraciones másicas

# Capítulo 3

## Resultados y análisis de resultados

En este capítulo se discutirán los resultados obtenidos durante la solución del modelo matemático al igual que se presentarán dichos resultados en las siguientes figuras.

### 3.1. Validación del método de solución

Para poder llevar acabo la validación del método de solución, se recurrió a resolver un problema que haya sido publicado en alguna fuente bibliográfica, veáse [Burden (2004)]. El problema consiste de un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales con 3 incógnitas. Para la solución de este sistema se utilizó un código Maple generado en base al metodo numérico de Newton Raphson según se ilustra en [Burden (2004)].

El sistema utilizado se encuentra formado por las siguientes ecuaciones

$$3x_1 - \cos(x_2x_3) - \frac{1}{2} = 0$$

$$x_1^2 - 81(x_2 + 0.1)^2 + \sin x_3 + 1.06 = 0$$

$$e^{-x_1x_2} + 20x_3 + \frac{10\pi - 3}{3} = 0$$

Para cada iteración se obtiene una aproximación de la solución al incrementarse el número de iteraciones, las soluciones van convergiendo a la solución exacta. En la tabla 3.1, se muestran los resultados obtenidos utilizando el método de solución, codificado en Maple 8.0 para el sistema de ecuaciones:

En la tabla 3.2, se observan los resultados reportados en la bibliografía:

Los resultados obtenidos utilizando el código generado en Maple 8.0 convergen hacia la misma solución que se reporta en la bibliografía, lo que valida satisfactoriamente al método de solución.

$k$	$x_1 - Maple$	$x_2 - Maple$	$x_3 - Maple$
0	0.10	0.10	-0.10
1	0.49986967	0.019466848	-0.52152047
2	0.50001424	0.001588591	-0.52355696
3	0.50000011	0.000012444	-0.52359845
4	0.50000000	0.000000000	-0.52359877
5	0.50000000	0.000000000	-0.52359877

Tabla 3.1: Raíces obtenidas para cada iteración ( $k$ ) con el método de solución en Maple 8.0

$k$	$x_1 - Burden$	$x_2 - Burden$	$x_3 - Burden$
0	0.10	0.10	-0.10
1	0.49986967	0.01946686	-0.52152047
2	0.50003702	0.00158859	-0.52355711
3	0.50004593	0.00001244	-0.52359845
4	0.50000000	0.00000000	-0.52359877
5	0.50000000	0.00000000	-0.52359877

Tabla 3.2: Raíces obtenidas para cada iteración ( $k$ ) reportadas en la bibliografía

### 3.2. Verificación del modelo matemático

La verificación del modelo matemático se llevó a cabo por medio del análisis y corroboración de los balances de materia. Los balances de materia tienen que justificar la entrada y salida de cada uno de los elementos y compuestos que participan en el proceso, por lo que se construyeron tablas de control para los módulos de cada uno de los procesos propuestos. Estas tablas de control muestran los flujos másicos de los compuestos así como los balances elementales por elemento o ión, además de las concentraciones y los flujos volumétricos de las corrientes acuosas. En las figuras 3.1, E.1 y E.2, de las páginas 53, 81 y 82 respectivamente, se muestran las tablas de control para la etapa de cargado en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor, las condiciones de operación fueron: un contenido de hierro en la calcina de 6.5 % Fe, una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y 2.00 para el despojo galvánico y un índice estequiométrico del zinc de 1.70.

### 3.3. Efecto del contenido de hierro en la calcina en el proceso convencional

El contenido de hierro en la calcina es una variable independiente de las variables de proceso que repercute en el consumo de insumos así como en la generación de productos. La figura 3.2, muestra el efecto del contenido de hierro sobre el consumo de la calcina, para el proceso hidrometalúrgico del zinc convencional, utilizando una concentración de ácido sulfúrico en el electrolito agotado de 49.03 kg / m<sup>3</sup> y una concentración de sulfato de zinc de 150 kg / m<sup>3</sup>.

<i>Especies</i>	<i>A1..kg/hr</i>	<i>O2-Cl..kg/hr</i>	<i>A21..kg/hr</i>	<i>O4-Cl..kg/hr</i>	<i>T. de Entrada</i>	<i>T. de Salida</i>	<i>Error</i>
<i>Fe2(SO4)3</i>	366.7438117	0	191.8633480	0	366.7438117	191.8633480	---
<i>H2SO4</i>	13.28590013	0	128.5702121	0	13.28590013	128.5702121	---
<i>ZnSO4</i>	920.2670245	0	942.3122080	0	920.2670245	942.3122080	---
<i>Fe(HA)3A3</i>	0	0	0	1744.912880	0	1744.912880	---
<i>Fe(HA)2A2</i>	0	4.463766500	0	0	4.463766500	0	---
<i>Zn(HA)2A2</i>	0	195.3067056	0	10.53088733	195.3067056	10.53088733	---
<i>Fe</i>	102.4387472	0.1855447884	53.59120010	49.03309190	102.6242920	102.6242920	0.
<i>Zn</i>	372.6522899	9.435733731	381.5792512	0.5087723357	382.0880236	382.0880235	0.1 10 <sup>-6</sup>
<i>SO4</i>	824.9326134	0	824.9326135	0	824.9326134	824.9326135	-0.1 10 <sup>-6</sup>
---	---	---	---	---	---	---	---
<i>Concentración</i>	<i>A1..kg/m^3</i>	<i>O2-Cl..kg/m^3</i>	<i>A21..kg/m^3</i>	<i>O4-Cl..kg..m^3</i>	<i>S.I.</i>	$\Phi$	<i>A/O</i>
<i>Fe</i>	17.58428800	0.02388749194	9.199283696	6.312640725	1.7	0.7	0.75
<i>Zn</i>	63.96822854	1.214779542	65.50060045	0.06550060045	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---
<i>Flujo</i>	<i>A1..m^3/h</i>	<i>O2-Cl..m^3/h</i>	<i>A21..m^3/h</i>	<i>O4-Cl..m^3/h</i>	---	---	---
<i>Volumétrico</i>	5.825584019	7.767445357	5.825584019	7.767445359	---	---	---

Figura 3.1: Tabla de control del primer tanque de cargo en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor.

Se puede observar que en la figura 3.2, de la página 54, que el consumo de calcina aumenta con el contenido de hierro. Esto se debe a que los cálculos se obtienen a partir de considerar una tonelada de zinc metálico a la salida del proceso, lo que provoca que el consumo de calcina cada vez sea mayor. El zinc contenido en la calcina debe mantenerse fijo para conservar la base de cálculo de una tonelada de zinc, por lo que necesariamente la masa de hierro contenida en la calcina debe de incrementarse. Esto conlleva a decir que el contenido de hierro controla el consumo de calcina.

La figura 3.3, muestra el efecto del contenido de hierro sobre el consumo de insumos y la formación de jarosita en el proceso convencional del zinc, utilizando una concentración de ácido sulfúrico en el electrolito agotado de 49.03 kg / m<sup>3</sup> y una concentración de sulfato de zinc de 150 kg / m<sup>3</sup>.

En la figura 3.3, se puede observar que el consumo de amoníaco y ácido sulfúrico dependen del contenido de hierro en la calcina. Al aumentar la masa de hierro en el sistema el consumo de amoníaco se incrementa, debido a que se requiere una mayor cantidad para poder precipitar el hierro en forma de jarosita. Lo mismo sucede con el ácido sulfúrico, el cual se utiliza para disolver el hidróxido férrico en la etapa de lixiviación ácida-caliente y reponer el sulfato que se elimina en la jarosita. Por otro lado, al existir una mayor cantidad de hierro, la masa de jarosita producida aumenta. En la actualidad este tipo de subproducto se almacena, ya que no cuenta con ninguna utilidad para la industria, por lo que se trata de buscar mejores opciones para la problemática del hierro. Debe notarse que todas estas tendencias son prácticamente lineales y esto se debe a que existe una fuerte dependencia con el contenido de hierro en la calcina, lo

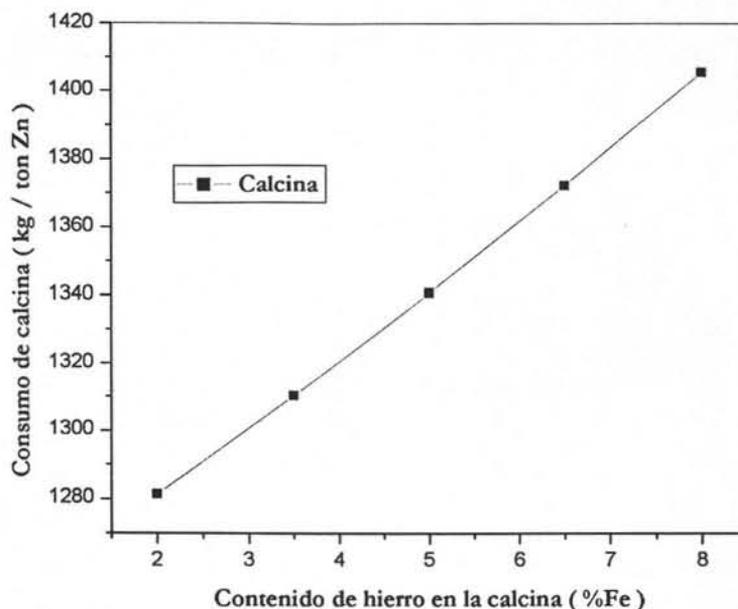


Figura 3.2: Efecto del contenido de hierro sobre el consumo de calcina, en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, utilizando una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 en el despojo, un índice estequiométrico del hierro de 2.70 y de 1.70 para el zinc.

que obliga a que los insumos así como los productos se consuman y se generen en proporción al hierro.

### 3.4. Efecto del índice estequiométrico del hierro en el proceso modificado

Si bien el índice estequiométrico es una variable dependiente del proceso afectada por las condiciones de operación. Esta variable se puede relacionar con otras variables del proceso que indican el desempeño del mismo. Primeramente se analizará en la propuesta de proceso en la que se usa el hierro como reductor.

#### 3.4.1. Consumo de insumos

La figura 3.4, muestra el efecto del índice estequiométrico del hierro sobre el consumo de insumos, para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión. Las condiciones del análisis fueron, relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75, relación acuoso-orgánico en el despojo de 2.00 y un contenido de hierro de 6.5% Fe en la calcina.

En la figura 3.4, se observa que el consumo de reductor aumenta en proporción al índice estequiométrico. Esto se debe a que la masa de reductor se encuentra directamente relacionada

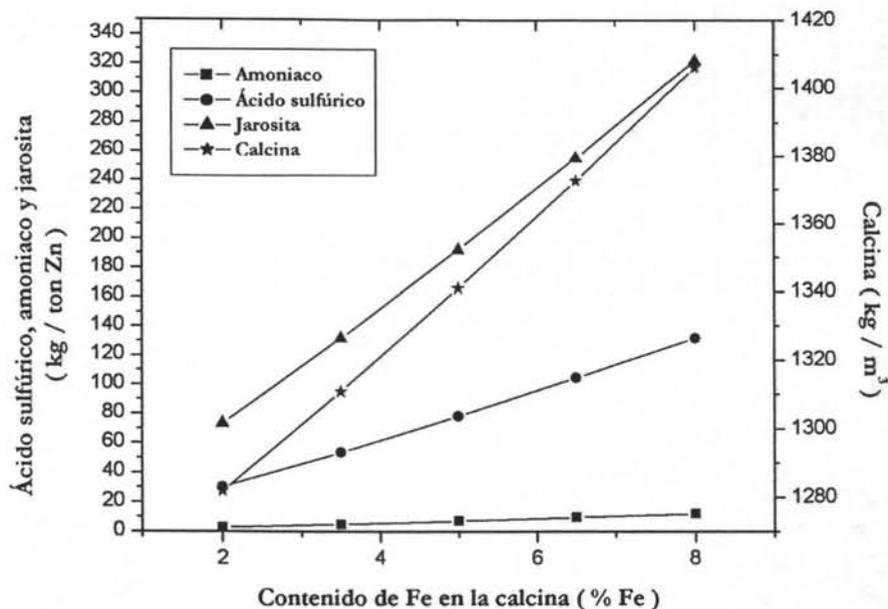


Figura 3.3: Efecto del contenido de hierro sobre el consumo de insumos y la formación de jarosita en el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc.

con el índice estequiométrico del hierro, ver ecuación 2.164, de la página 36. Esta ecuación predice la masa de reductor y de hidrógeno en función de las moles que se consumen en exceso ( $\phi$ ) en el despojo galvánico. La relación  $\left(\frac{1+\phi}{\phi}\right)$ , se obtiene a partir de la reacción 2.162, de la página 35. A su vez, el valor de  $\phi$  se encuentra en función del índice estequiométrico del hierro, ver ecuación 2.165, de la página 36. Por lo tanto, al incrementarse el índice estequiométrico del hierro, el valor de  $\phi$  también se incrementa, lo que conlleva a que se requiera una mayor cantidad de reductor. Esto tiene implicaciones prácticas en el proceso porque cuantifica la eficiencia del reductor.

En la figura 3.4, también se observa que el consumo de agua y el consumo de aire aumentan en proporción al índice estequiométrico del hierro. Esto se debe a que el oxígeno contenido en el agua y el aire, está estrechamente relacionado con el oxígeno presente en la hematita formada durante la piroconversión, véase el balance de materia del oxígeno, en el proceso de piroconversión utilizando hierro como elemento reductor, ecuación 2.182, de la página 39. La hematita producida lleva una masa de este oxígeno ver la reacción 2.179, de la página 38, y es proporcional al consumo de masa de reductor, la cual a su vez, se relaciona directamente con el índice estequiométrico. Desde el punto de vista práctico, el índice estequiométrico controla el consumo de agua y aire, según la eficiencia del reductor. La razón de esta dependencia líneas es que el hierro que es introducido al proceso en forma de reductor aumenta de forma directa la cantidad de hierro que debe ser eliminada y por consiguiente el consumo de los insumos necesarios para llevar a cabo la eliminación.

El consumo de calcina no presenta ninguna alteración con el índice estequiométrico ( $\zeta_{Fe}$ ) del hierro. Esto se debe a que la calcina solamente aumenta en función del contenido de hierro.

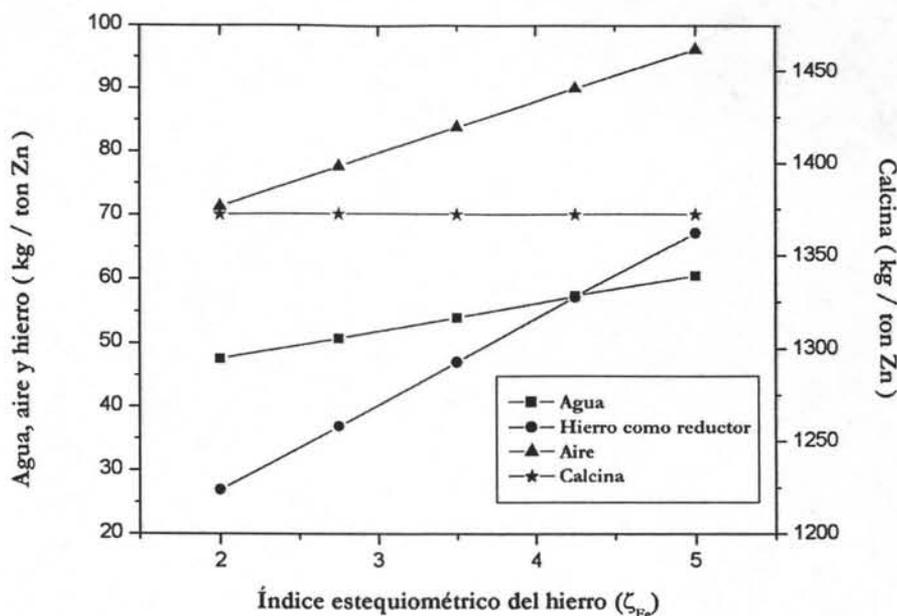


Figura 3.4: Efecto del índice estequiométrico del hierro sobre el consumo de insumos, en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, utilizando una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75, una relación acuoso-orgánico en el despojo de 2.00 y un contenido de hierro de 6.5 % Fe en la calcina.

Ya que como se ve en la ecuación 2.164, de la página 36, el índice estequiométrico solamente afecta a las variables relacionadas con la masa de reductor y la masa de hidrógeno gaseoso generado en el proceso de despojo galvánico.

### 3.4.2. Generación de productos y subproductos

La figura 3.5, muestra el efecto del índice estequiométrico del hierro sobre la formación de productos, en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión usando hierro como reductor. Las condiciones de análisis fueron, relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75, relación acuoso-orgánico en el despojo de 2.00 y un contenido de hierro de 6.5 % Fe en la calcina.

En la figura 3.5, se observa que la masa de hematita generada aumenta a medida que el índice estequiométrico crece. Esto se debe a que la masa de hematita es proporcional al hierro eliminado y al consumido en exceso ( $\phi$ ), en el despojo galvánico. La variable  $\phi$  se relaciona directamente con el índice estequiométrico, véase la ecuación 2.164, de la página 36. Cuando el índice estequiométrico crece el valor de  $\phi$  aumenta, de acuerdo a la ecuación 2.165, de la página 36, se incrementa la masa de reductor. Esto a su vez, origina que la masa de cristales de cloruro ferroso se incremente. Por otro lado, el hierro presente en los cristales de cloruro ferroso, se encuentra directamente relacionado con el hierro de la hematita formada en la piroconversión, ver balance de materia del hierro en la etapa de la piroconversión, ecuación 2.180, de la página 38. A partir de esta ecuación se puede entender la relación que existe entre el hierro proveniente

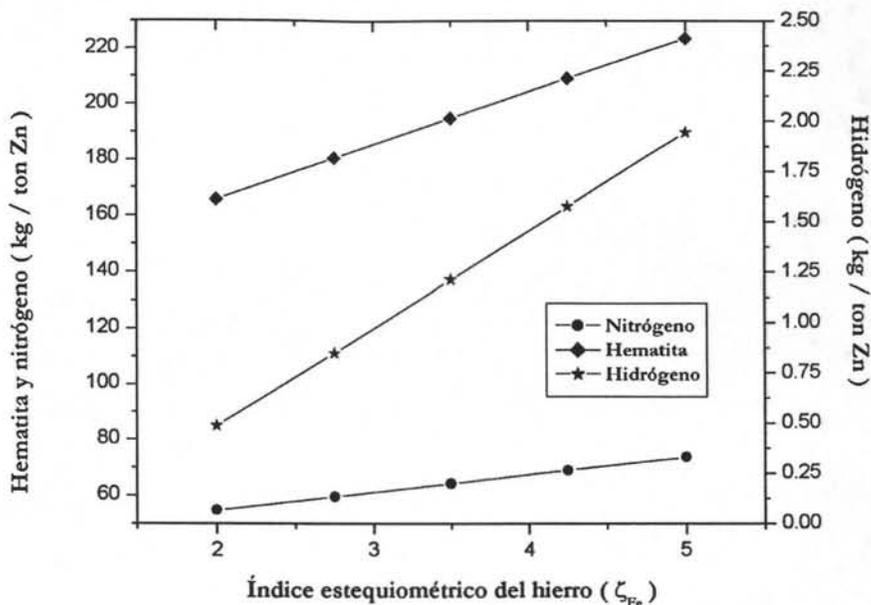


Figura 3.5: Efecto del índice estequiométrico del hierro sobre la formación de productos, en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, utilizando una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75, una relación acuoso-orgánico en el despojo de 2.00 y un contenido de hierro del 6.5 % Fe en la calcina.

de los cristales y el hierro presente en la hematita, y así su relación con el índice estequiométrico.

En la figura 3.5, también se observa que la formación de nitrógeno aumenta a medida que crece el índice estequiométrico. Este aumento se debe a que la formación de nitrógeno depende de la cantidad de hierro que se encuentre presente en los cristales de cloruro ferroso, y estos a su vez dependen del índice estequiométrico del hierro como ya se vio anteriormente. El nitrógeno proviene del aire que se requiere para llevar a cabo la reacción de formación de la hematita en la etapa de la piroconversión, ver ecuación 2.179, de la página 38. Por lo tanto, si el consumo de aire aumenta a medida que crece la masa de hierro en los cristales de cloruro ferroso, entonces la masa de nitrógeno crecerá. Este subproducto es realmente útil en el proceso porque se puede utilizar para favorecer las condiciones reductoras en el despojo galvánico.

Finalmente en la figura 3.5, también se observa que la formación de hidrógeno gaseoso aumenta a medida que crece el índice estequiométrico. Esto se debe a que la masa de hidrógeno gaseoso está en función de las moles en exceso ( $\phi$ ) que entran al despojo galvánico, así como de la masa de reductor, ver ecuación 2.164, de la página 36. Desde el punto de vista industrial el hidrógeno es importante ya que se trata de un subproducto con un alto valor industrial, ya que se trata de un compuesto que sirve para la elaboración de hidrocarburos. En la actualidad existe un gran número de procesos que requieren el hidrógeno como materia prima.

De ninguna manera es deseable industrialmente operar con índices estequiométricos elevados. Por lo que el índice estequiométrico debe permanecer bajo para operar con una mejor eficiencia y evitar así el consumo innecesario de insumos de producción y de generación de

subproductos.

### 3.5. Efecto del índice estequiométrico del zinc en el proceso modificado

Cuando se utiliza zinc como reductor se tienen resultados que muestran las ventajas y desventajas que tiene el zinc respecto al hierro

#### 3.5.1. Consumo de insumos

La figura 3.6, muestra el efecto del índice estequiométrico del zinc sobre el consumo de insumos, para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión usando zinc como reductor. Las condiciones de análisis fueron: una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 en el despojo galvánico y un contenido de hierro de 6.5 % Fe en la calcina.

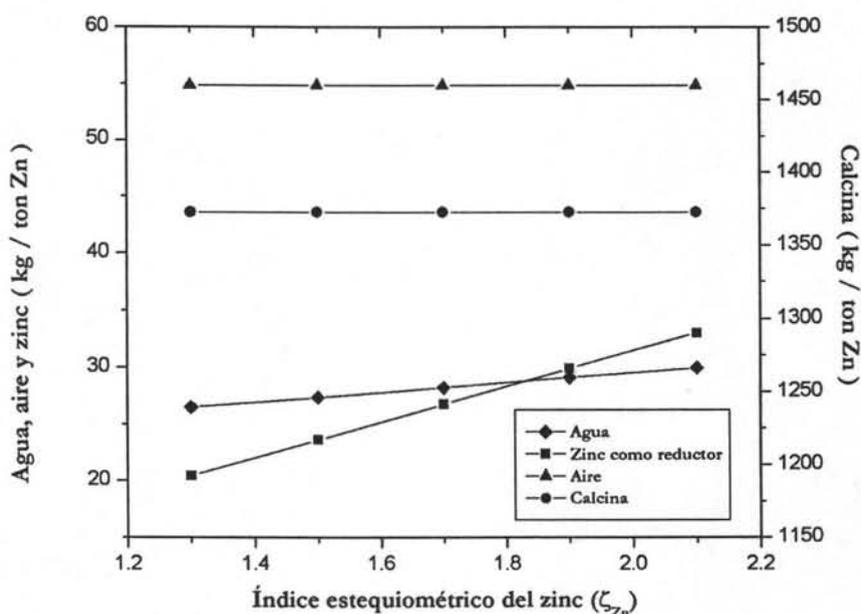


Figura 3.6: Efecto del índice estequiométrico del zinc sobre el consumo de insumos en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, utilizando una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75, una relación acuoso-orgánico en el despojo de 2.00 y un contenido de hierro de 6.50 % Fe en la calcina.

En la figura 3.6, se observa que el consumo de agua aumenta al incrementarse el índice estequiométrico. Esto se debe a que el agua equilibra la cantidad de hidrógeno de salida del proceso de implantación, en particular el hidrógeno que se genera en la etapa del despojo galvánico, ver balance global de hidrógeno, ecuación 2.215, de la página 45. El hidrógeno que se

genera en la etapa del despojo galvánico, se relaciona directamente con el índice estequiométrico por medio de las moles en exceso de reductor, las cuales se introducen a la etapa del despojo galvánico, ver ecuación 2.208, de la página 44. Por lo tanto, al crecer el índice estequiométrico aumenta la cantidad de hidrógeno, lo que a su vez, hace que se requiera una mayor cantidad de agua en la etapa de la piroconversión.

En la figura 3.6, también se observa que el consumo de aire y calcina no presenta ninguna alteración por el índice estequiométrico del zinc. Esto se debe a que ambas variables no dependen de éste. La masa de aire que se introduce al proceso depende de la cantidad de hierro que se elimina. Al utilizar zinc como reductor, la masa de hierro que se elimina es la misma que se introduce en la calcina. Como se vió en la sección 3.1 de este capítulo, la calcina no se encuentra en función del índice estequiométrico, por lo tanto, no existe un aumento en la masa de hierro eliminado, lo que conlleva a que el consumo de aire se mantenga constante. Esto no ocurrió cuando se simuló el uso de hierro como reductor y esto se debe a que el zinc no forma parte de la piroconversión.

En la figura 3.6, se puede observar que el consumo de reductor aumenta con el índice estequiométrico. Esto se debe a que la masa de reductor se encuentra directamente relacionada con las moles en exceso  $\phi$ , ver ecuación 2.208, de la página 44. Estas moles en exceso se encuentran en función del índice estequiométrico, por medio de la ecuación 2.165, de la página 36. Por lo tanto, al crecer el índice estequiométrico aumenta el valor de  $\phi$ , lo que provoca que se requiera una mayor cantidad de reductor. La relación  $\left(\frac{1+\phi}{\phi}\right)$ , se obtiene a partir de la ecuación 2.205, de la página 43 y sirve para relacionar la masa de reductor con la masa de hidrógeno gaseoso en la etapa del despojo galvánico.

### 3.5.2. Generación de productos y subproductos

La figura 3.7, muestra el efecto del índice estequiométrico del zinc sobre la formación de productos, para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, utilizando una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75, una relación acuoso-orgánico en el despojo de 2.00 y un contenido de hierro de 6.5 % Fe en la calcina.

En la figura 3.7, se puede observar que la formación de hematita y nitrógeno no presenta ninguna alteración por el cambio en el índice estequiométrico del zinc. Esto se puede atribuir a que estos productos no se encuentran en función del índice estequiométrico. El nitrógeno depende en su totalidad del consumo de aire en la piroconversión. Por lo tanto, al no existir una eliminación de hierro adicional, el consumo aire se mantiene constante. Lo mismo sucede con la hematita, la cual depende de la masa de hierro presente en los cristales de cloruro ferroso, y estos a su vez del tipo de reductor. Al utilizar zinc como reductor, la masa de hierro despojado se mantiene constante y por lo tanto la hematita formada en la piroconversión también.

En la figura 3.7, se puede observar que la formación de hidrógeno aumenta a medida que crece el índice estequiométrico. Esto se debe a que el hidrógeno se relaciona directamente con las moles en exceso de reductor, ver ecuación 2.208, de la página 44. Esta ecuación es del tipo lineal, donde la pendiente se expresa como:  $\left(\frac{1+\phi}{\phi}\right) \cdot \left(\frac{M_{H_2}}{M_{Zn}}\right)$ . Por lo tanto si el índice estequiométrico aumenta el valor de  $\phi$  también lo hace, lo que conlleva a que el valor de la pendiente se incremente. Además, el valor de  $\phi$  está en función del índice estequiométrico, ver ecuación

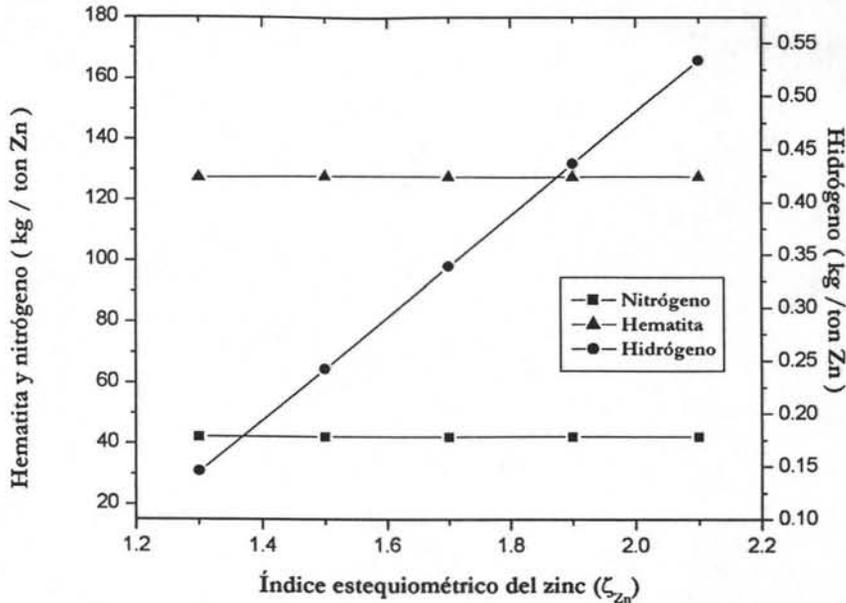


Figura 3.7: Efecto del índice estequiométrico del zinc sobre la formación de productos en el proceso hidrometalúrgico del zinc modificado con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, utilizando una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75, una relación acuoso-orgánico en el despojo de 2.00 y un contenido de hierro de 6.5 % Fe en la calcina.

2.165, de la página 36. Esto explica el incremento en la masa de hidrógeno en función del índice estequiométrico. Debe señalarse que el hidrógeno puede utilizarse como materia prima para otros procesos como son la producción de amoníaco para fertilizantes o como la desulfuración de los productos derivados del petróleo.

### 3.6. Efecto del contenido de hierro en la calcina en los procesos modificados

#### 3.6.1. Consumo de insumos

La figura 3.8, muestra el efecto del contenido de hierro en la calcina sobre el consumo de insumos, utilizando hierro y zinc como reductor. Las condiciones de análisis fueron: un índice estequiométrico del hierro de 2.75 y de 1.70 para el zinc, una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 en el despojo galvánico. Estos valores se eligieron de acuerdo a las otras condiciones propuestas en la simulación.

En la figura 3.8, se observa que el consumo de reductor aumenta con el contenido de hierro. Esto se debe a que al existir una mayor cantidad de hierro en la calcina, se requiere un mayor consumo de reductor para llevar a cabo el despojo. Esto sucede en ambos casos de acuerdo a las reacciones globales de despojo, ecuaciones 2.157 y 2.202, de las páginas 35 y 43, respectivamente. Estas reacciones relacionan el hierro proveniente de la calcina con el reductor.

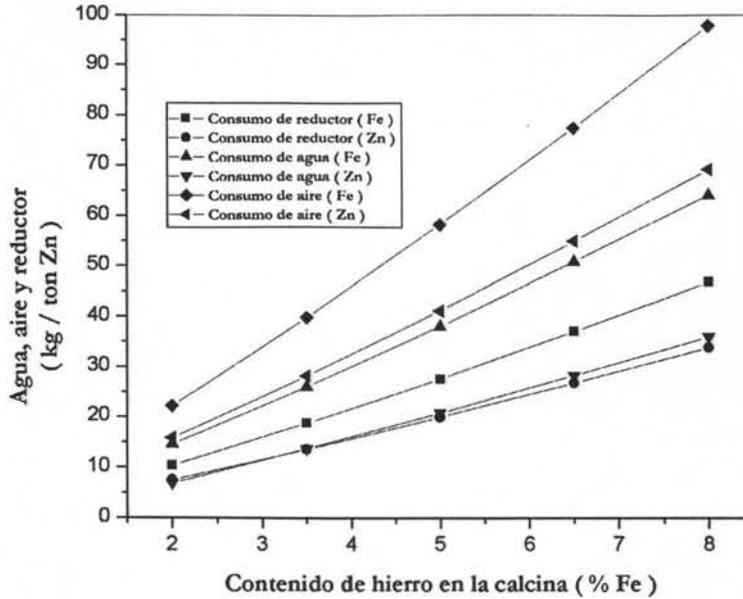


Figura 3.8: Efecto del contenido de hierro sobre el consumo de insumos, utilizando hierro y zinc como reductores, suponiendo un índice estequiométrico del hierro ( $\zeta_{Fe}$ ) de 2.75 y un índice estequiométrico del zinc ( $\zeta_{Zn}$ ) de 1.70, una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 en el despojo galvanizado.

Al utilizar hierro como elemento reductor su consumo es mayor que el correspondiente al zinc. Esto se debe a que el índice estequiométrico del hierro es mucho mayor al del zinc, por lo tanto su eficiencia es menor. El zinc por el contrario tiene un índice estequiométrico bajo lo que lo hace que sea un reductor más eficiente y por lo tanto su consumo es menor. Por otro lado, la chatarra de zinc puede ser obtenida de la misma planta de extracción, lo que hace que el costo de este metal quizá sea menor en comparación a lo que se podría pagar por la chatarra de hierro. Además de que el zinc puede ser recirculado en el mismo proceso y así poder evitar las pérdidas de material. Por todo esto se puede especular que el zinc es una mejor opción para la industria hidrometalúrgica.

Además, en la figura 3.8, también se observa que el consumo de agua aumenta con el contenido de hierro. Esto se debe a que la cantidad de hierro se incrementa a medida que aumenta el contenido de hierro en la calcina. Por otro lado, se sabe que parte del oxígeno presente en el agua introducida al proceso sirve para llevar a cabo la formación de la hematita en la piroconversión, ver ecuación 2.182, de la página 39. Por lo tanto, al elevarse la cantidad de hierro en la calcina aumenta la cantidad de cristales de cloruro ferroso que son introducidos a la piroconversión, por lo que el consumo de agua se incrementa.

Por otro lado, en la figura 3.8, se observa que el consumo de agua utilizando hierro como reductor es mayor al consumo de agua utilizando zinc. Esto se debe a que al utilizar hierro, existe una mayor cantidad de cristales de cloruro ferroso a convertir. El hierro introducido en la calcina y el hierro que entra como reductor se eliminan en forma de hematita lo que repercute

directamente en una mayor cantidad de agua para poder llevar a cabo la reacción de formación, véase la ecuación 2.179, de la página 38. Al utilizar zinc como reductor el consumo de agua se reduce en comparación con el del hierro, debido a que no se forman los cristales de cloruro de hierro. Por lo tanto, el consumo de agua es proporcional exclusivamente al contenido de hierro en la calcina, por lo que se puede pensar que el zinc puede ser una opción viable al proceso ya que se requeriría de una menor cantidad de agua.

Como también se puede apreciar en la figura 3.8, el consumo de aire aumenta con el contenido de hierro, porque la cantidad de hierro en la calcina se incrementa. Este hierro se manifiesta como cloruro ferroso y cuya conversión requiere una mayor cantidad de aire. Sin embargo, al comparar los dos reductores se puede ver que existe un mayor consumo de aire utilizando hierro como reductor, debido a que todo el hierro introducido al proceso debe ser eliminado en forma de hematita. Esto incrementa la formación de cristales de cloruro ferroso, consumiéndose una mayor cantidad de aire en la piroconversión. Por otro lado, al utilizar zinc como reductor, solamente participa el hierro contenido en la calcina. Por lo que la formación de cristales de cloruro ferroso es menor en comparación con los formados con el hierro como reductor, provocando que el consumo de aire sea menor.

Resumiendo, se puede decir que técnicamente el zinc es la mejor opción para poder eliminar el hierro contenido en la calcina, ya que al utilizarlo no sólo se requiere de una menor cantidad de reductor sino que también el consumo de insumos se reduce en comparación al hierro, probablemente repercutiendo directamente en los costos de producción. Desde el punto de vista económico, se debe reconsiderar esta recomendación con datos sobre los precios de las chatarras.

### 3.6.2. Generación de productos y subproductos

La figura 3.9, muestra el efecto del contenido de hierro en la calcina sobre la formación de productos, utilizando hierro y zinc como reductores. Las condiciones de análisis fueron: un índice estequiométrico del hierro de 2.75. y de 1.70 para el zinc, una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 para el despojo galvánico.

En la figura 3.9, se observa que la formación de hematita aumenta con el contenido de hierro. Esto se debe a que al existir una mayor cantidad de hierro en la calcina, éste se adiciona al que se introduce al proceso en forma de reductor y cuyo total debe ser eliminado durante la piroconversión, provocando un incremento en la formación de hematita. Además, existe una mayor formación de hematita cuando se utiliza hierro como reductor en vez de zinc, debido a que el zinc no participa en la conversión de hematita. Lo anterior se puede reflejar en una mayor ganancia, debido a que la hematita formada durante el proceso de piroconversión tiene un alto contenido de hierro, el cual se puede utilizar en la fabricación de acero libre de intersticiales.

En la figura 3.9, se observa que el nitrógeno generado aumenta con el contenido de hierro en la calcina. Esto ocurre ya que al existir una mayor cantidad de hierro, la masa de cristales de cloruro ferroso se incrementa, la cual requiere de un mayor volumen de aire para poder llevar a cabo la conversión de la hematita. Por consiguiente, al incrementarse el consumo de aire, la cantidad de nitrógeno residual en el despojo galvánico aumenta. Por otro lado, al utilizar el hierro como reductor, se obtiene una mayor cantidad de nitrógeno en comparación con el zinc. Como resultado el flujo de aire depende de la cantidad de cloruro ferroso a convertir en

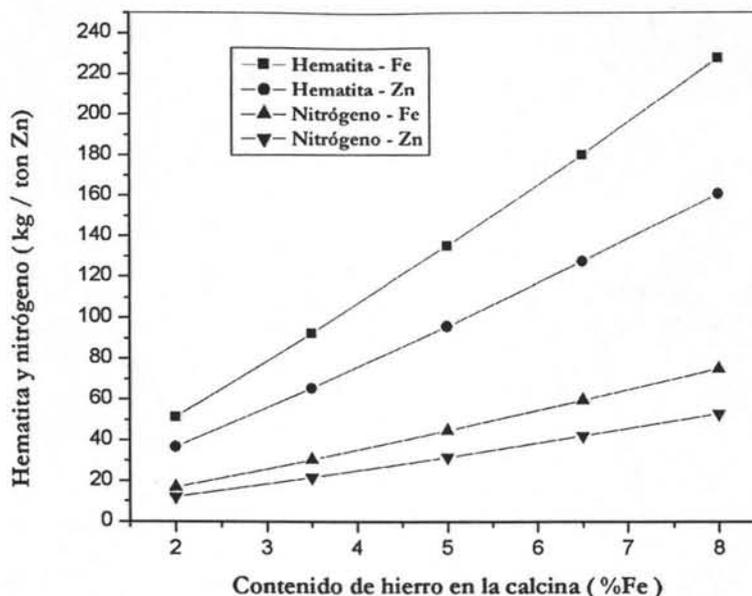


Figura 3.9: Efecto del contenido de hierro sobre la formación de productos, utilizando hierro y zinc como reductores, utilizando un índice estequiométrico del hierro de 2.75 y de 1.70 para el zinc, una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 para el despojo galvánico.

la piroconversión y esté a su vez del hierro total contenido en el proceso. Dado que el hierro utilizado como reductor también es eliminado en forma de hematita, se produce una mayor cantidad de cloruro ferroso, ocasionando así un incremento en el flujo aire y por lo tanto de nitrógeno. El nitrógeno residual es útil en el proceso puesto que se puede emplear para mantener las condiciones reductoras.

En la figura 3.10, se observa el efecto del contenido de hierro sobre la formación de hidrógeno bajo las siguientes condiciones: un índice estequiométrico del hierro de 2.75. y de 1.70 para el zinc, una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 para el despojo galvánico..

En la figura 3.10, se observa que la evolución de hidrógeno aumenta con el contenido de hierro en la calcina como resultado del incremento en la masa de éste. Al aumentar la masa de hierro en el sistema, la cantidad de reductor se incrementa, lo cual a su vez genera una mayor cantidad de hidrógeno residual, veáse ecuación 2.164, de la página 36. Sin embargo, el volumen de hidrógeno residual se reduce al utilizar zinc como reductor. Esto se debe a que el índice estequiométrico del hierro es mayor al del zinc. La producción de un subproducto tan importante como el hidrógeno hace ver al proceso de implantación del despojo galvánico y la piroconversión atractivo desde el punto de vista económico y ambiental. Las características físicas y químicas del hidrógeno lo hacen muy valioso para muchas industrias y sus usos varían enormemente desde aplicaciones en la industria alimentaria hasta semiconductores. de todos modos el hidrógeno se puede recircular para ayudar a mantener las condiciones reductoras.

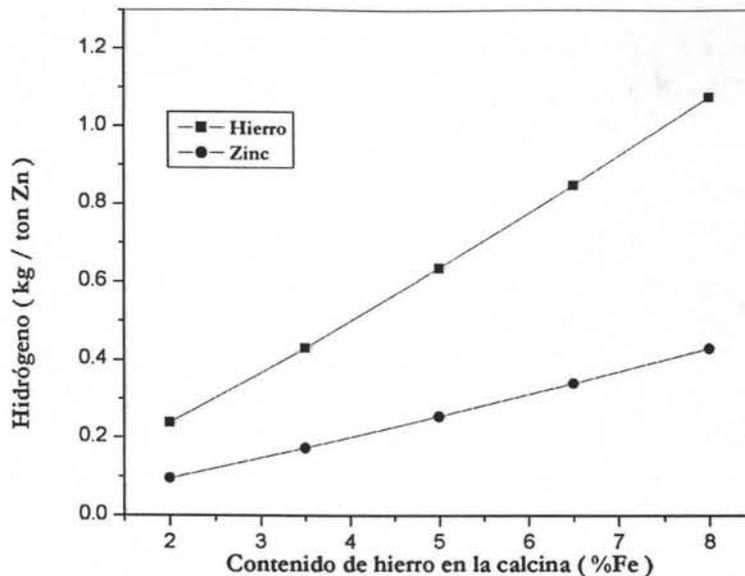


Figura 3.10: Efecto del contenido de hierro sobre la formación de hidrógeno, utilizando hierro y zinc como reductores, un índice estequiométrico del hierro de 2.75 y de 1.70 para el zinc y una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y 2.00 para el despojo galvánico.

### 3.7. Efecto del índice estequiométrico del zinc sobre la concentración de zinc en la corriente $A_3$

La corriente  $A_3$ , según se muestra en la figura 2.3, de la página 40, se selecciona por que en ella se puede determinar la concentración de hierro con la que sale la solución despues del proceso del despojo galvánico y la piroconversión, y así poder determinar la cantidad de hierro que se elimina gracias al acoplamiento.

La figura 3.11, muestra el efecto del índice estequiométrico del zinc ( $\zeta_{Zn}$ ) sobre la concentración de zinc en la corriente  $A_3$ , para el proceso de implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor, con un contenido de hierro en la calcina de 6.5% Fe, una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 para el despojo galvánico.

En la figura 3.11, se observa que la concentración de zinc en el acuoso depende de la eliminación del hierro. El zinc que entra al sistema como reductor se despoja en la etapa de cargado del hierro. Al aumentar  $\zeta_{Zn}$ , el consumo de ácido sulfúrico se incrementa de acuerdo a la reacción química de despojo del zinc ver la reacción 2.190, de la página 41. Así, se observa que al aumentar la concentración de zinc en el acuoso, la concentración de ácido sulfúrico disminuye. Esto podría conllevar a que se requiera una cantidad mayor de ácido sulfúrico en la etapa de lixiviación neutra, con el fin de disolver las ferritas, las cuales se emplean para neutralizar la solución y favorecer las condiciones de precipitación del hidróxido férrico.

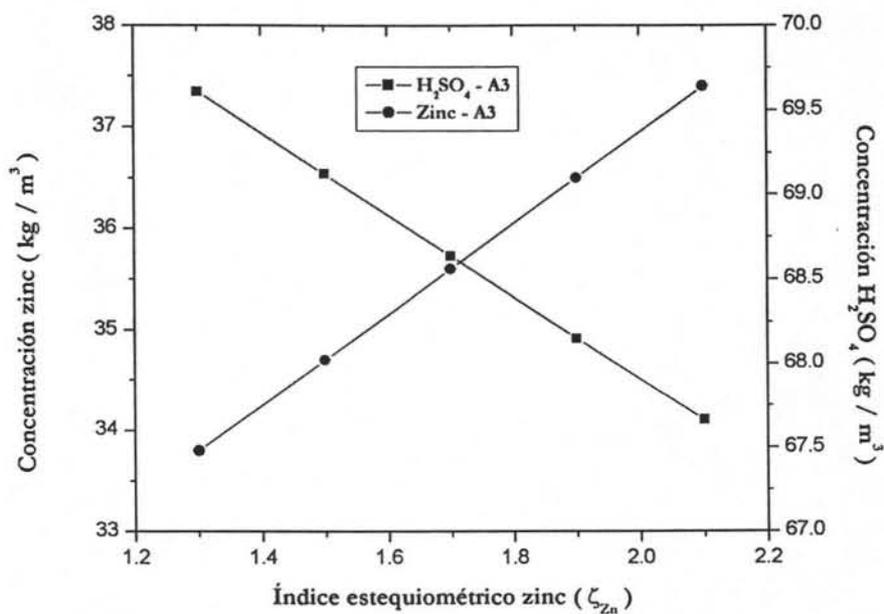


Figura 3.11: Efecto del índice estequiométrico del zinc sobre la concentración de zinc en la corriente  $A_3$ , para el proceso de implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor, un contenido de hierro en la calcina de 6.5% Fe, una relación acuoso-orgánico en el cargado de 0.75 y de 2.00 para el despojo galvánico.

# Capítulo 4

## Conclusiones

Las conclusiones obtenidas se presentan a continuación:

1. Es posible construir un modelo matemático basado en los balances de materia para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc.
2. Similarmente se pudieron desarrollar los modelos matemáticos para las dos propuestas de proceso presentadas: 1) proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico utilizando hierro como reductor y piroconversión, y 2) una variante de la anterior utilizando zinc como reductor.
3. Mediante estos modelos fue posible simular el efecto de las variables críticas sobre el comportamiento de los procesos, dando origen a las siguientes conclusiones particulares:
  - a) El contenido de hierro en la calcina es una variable importante que afecta fuertemente el comportamiento de los procesos, ya que el incremento de está influye directamente en un mayor consumo de insumos de producción así como en la generación de productos y subproductos.
  - b) En el proceso hidrometalúrgico del zinc, con implantación del despojo galvánico y la piroconversión, el incremento en el índice estequiométrico, tanto usando el hierro como el zinc como reductores, aumenta el consumo de insumos y de subproductos. Dado el fuerte impacto que tiene sobre la economía del proceso, el índice estequiométrico es una de las variables que requieren mayor atención para futuras investigaciones.
  - c) Dado que el índice estequiométrico del hierro es mayor al índice estequiométrico del zinc y que éste provoca un mayor consumo de insumos y una mayor cantidad de subproductos para el hierro, es importante buscar medios para minimizar el efecto de esta variable.
4. Los resultados obtenidos de la simulación del proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico acoplado a la piroconversión, nos muestran que es viable desde el punto de vista teórico el desarrollo de una planta piloto con el fin de sustituir el proceso actual de la jarosita.

# Bibliografía

- [Felder (1999)] Richard M. Felder, Ronald W. Rousseau, Principios elementales de los procesos químicos, Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, 2da edición, México (1999), pp 200-201
- [James (2000)] S. E. James, J. L. Watson, J. Peter, Zinc production - a survey of existing smelters and refineries, Lead - Zinc 2000, TMS. Warrendale PA, USA. 2000, pp 205-225
- [Burden (2004)] Richard Burden and J. Douglas Faires, Numerical Analysis, 8th edition, 2004, 597-640
- [Barrera (2002)] J. Antonio Barrera Godínez, T. J. O'Keefe, A. Ortega-R, Bernardo Hernández-M, A. Ingalls-C, L. Soto-C and C. A. Suarez-R, Testing of galvanic and pyroconversion as an alternative to jarosite production, Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects. Volume 2. Bo Björkman, Caisa Samuelson and Jan-Olov Wikström, Luleå University of Technology, TMS and MEFOS. Luleå, Suecia. 2002. pp 319-328. ISBN - 91-631-2362-2.
- [Barrera (2000)] J. Antonio Barrera Godínez, J. Sun, T. J. O'Keefe and S. E. James, The galvanic stripping treatment of zinc residues for marketable iron product recovery, Lead - Zinc 2000. TMS. Warrendale PA, USA. 2000. pp. 763-778
- [Barrera (2003)] J. A. Barrera G., A. Ortega R., J.B. Hernández M., A. Ingalls C., L. Soto C., E. Valadez y M.S. Oviedo, Efecto del pH, la relación A/O y el área del reductor sobre la eliminación de hierro mediante el despojo galvánico, C. Memorias del XIII Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva. La Metalurgia del Siglo XXI. Universidad de Sonora. Guaymas, Sonora México. Disco compacto. 2003.
- [Romero] Francisco M. Romero, María A. Armienta y Lupita Villaseñor, Evaluación de la peligrosidad potencial de jales mineros, Contaminación por actividad minera, <http://www.ugm.org.mx>

- [Perez (2004)] Isabel Perez, María A. Armienta, Guadalupe Villaseñor, O. Cruz, A. Aguayo y N. Cisneros, Procesos de oxidación en una presa de jales en el distrito minero de Zimapan, Hidalgo, Actas INAGEQ, Volumen 10 No.1, Septiembre 2004, <http://www.inageq.org.mx>
- [Uusipaavalniemi (1996)] E. Uusipaavalniemi and S. G. Karlman, Handling of iron at the zinc plant in Kokkola, Iron control and disposal 1996 pp 101-115
- [Tamargo (1996)] F. J. Tamargo, F. San Martin and M. R. Valcarcel, Asturiana de zinc: more than thirty years of experience with the jarosite process, Iron control and disposal 1996 pp 93-100
- [Chang (1996)] Chi-Ming Chang, Haiyang Gu and T. J. O'Keefe, Galvanic stripping of iron from solvent extraction solutions from zinc residue leaching, Iron control and disposal 1996 pp 417-428
- [Ciriello (1996)] C. Ciriello and J. A. Synnott, The effect of process parameters on the precipitation of sodium jarosite at kidd, Iron control and disposal 1996 pp117-134
- [Chang (1997)] Raymond Chang, Química, Ed. Mc Graw Hill, 4ta edición, México 1997
- [Perry (2001)] Robert H. Perry, Don W. Green and James O. Maloney, Perry Manual del Ingeniero Químico, Volumen 2-17 Ed. Mc Graw Hill, 6ta edición, México 2001

# Apéndice A

## Notación para el método de solución del proceso hidrometalúrgico del zinc convencional

Es necesario construir una notación que permita relacionar las variables del modelo matemático con las variables del método de solución. Por otro lado, es conveniente utilizar una secuencia de datos en lugar de una notación especial para cada una de las variables propuestas en el modelo matemático. Es por eso que a continuación se presenta la notación utilizada en el modelo matemático y el método de solución para cada una de las variables, mostrando su representación en el modelo y su equivalencia en el método, además del significado y la unidad para cada una de ellas.

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$W$	Alimentación de calcina	$\frac{kg}{hr}$	$W$
$X$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la calcina	$\frac{kg}{kg}$	$X$
$Y$	Fracción de $ZnO$ en la calcina	$\frac{kg}{kg}$	$Y$
$W_2$	Flujo másico de calcina de la corriente 2	$\frac{kg}{hr}$	$x_1$
$W_3$	Flujo másico de calcina de la corriente 3	$\frac{kg}{hr}$	$x_2$

Tabla A.1: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$W_{19}$	Flujo másico de calcina de la corriente 19	$\frac{kg}{hr}$	$x_3$
$W_{20}$	Flujo másico de calcina de la corriente 20	$\frac{kg}{hr}$	$x_4$
$W_{21}$	Flujo másico de calcina de la corriente 21	$\frac{kg}{hr}$	$x_5$
$W_{22}$	Flujo másico de calcina de la corriente 22	$\frac{kg}{hr}$	$x_6$
$\omega_{Hm}^6$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la corriente 6	$\frac{kg}{kg}$	$y_1$

Tabla A.2: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\omega_{HF}^6$	Fracción de $Fe(OH)_3$ en la corriente 6	$\frac{kg}{kg}$	$y_2$
$\omega_{Cn}^6$	Fracción de $ZnO$ en la corriente 6	$\frac{kg}{kg}$	$y_3$
$W_6$	Flujo másico de la corriente 6	$\frac{kg}{hr}$	$y_4$
$\rho_{SZ}^5$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 5	$\frac{kg}{m^3}$	$y_5$
$Q_4$	Flujo volumétrico de la corriente 4	$\frac{m^3}{hr}$	$y_6$

Tabla A.3: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$Q_5$	Flujo volumétrico de la corriente 5	$\frac{m^3}{hr}$	$y_7$
$\omega_{Hm}^8$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la corriente 8	$\frac{kg}{kg}$	$y_8$
$\omega_{HF}^8$	Fracción de $Fe(OH)_3$ en la corriente 8	$\frac{kg}{kg}$	$y_9$
$\omega_{Hm}^{11}$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la corriente 11	$\frac{kg}{kg}$	$y_{10}$
$\omega_{HF}^{11}$	Fracción de $Fe(OH)_3$ en la corriente 11	$\frac{kg}{kg}$	$y_{11}$

Tabla A.4: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\omega_{Cn}^8$	Fracción de $ZnO$ en la corriente 8	$\frac{kg}{kg}$	$y_{12}$
$\omega_{Cn}^{11}$	Fracción de $ZnO$ en la corriente 11	$\frac{kg}{kg}$	$y_{13}$
$W_8$	Flujo másico de la corriente 8	$\frac{kg}{hr}$	$y_{14}$
$W_{11}$	Flujo másico de la corriente 11	$\frac{kg}{hr}$	$y_{15}$
$\rho_{SZ}^7$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 7	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{16}$

Tabla A.5: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\rho_{SZ}^{10}$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 10	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{17}$
$Q_7$	Flujo volumínico de la corriente 7	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{18}$
$Q_9$	Flujo volumínico de la corriente 9	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{19}$
$Q_{10}$	Flujo volumínico de la corriente 10	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{20}$
$\omega_{Hm}^{15}$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la corriente 15	$\frac{kg}{kg}$	$y_{21}$

Tabla A.6: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\omega_{Cn}^{15}$	Fracción de $ZnO$ en la corriente 15	$\frac{kg}{kg}$	$y_{22}$
$W_{15}$	Flujo másico de la corriente 15	$\frac{kg}{hr}$	$y_{23}$
$\rho_{SF}^{17}$	Concentración de $Fe_2(SO_4)_3$ en la corriente 17	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{24}$
$\rho_{SZ}^{17}$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 17	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{25}$
$\rho_{AS}^{17}$	Concentración de $H_2SO_4$ en la corriente 17	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{26}$

Tabla A.7: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$Q_{17}$	Flujo volumínico de la corriente 17	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{27}$
$\omega_{Hm}^{18}$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la corriente 18	$\frac{kg}{kg}$	$y_{28}$
$\omega_{Cn}^{18}$	Fracción de $ZnO$ en la corriente 18	$\frac{kg}{kg}$	$y_{29}$
$W_{18}$	Flujo másico de la corriente 18	$\frac{kg}{hr}$	$y_{30}$
$\rho_{SF}^{13}$	Concentración de $Fe_2(SO_4)_3$ en la corriente 13	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{31}$

Tabla A.8: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\rho_{SZ}^{13}$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 13	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{32}$
$\rho_{AS}^{13}$	Concentración de $H_2SO_4$ en la corriente 13	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{33}$
$Q_{13}$	Flujo volumínico de la corriente 13	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{34}$
$\omega_{Hm}^{25}$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la corriente 25	$\frac{kg}{kg}$	$y_{35}$
$\omega_{Cn}^{25}$	Fracción de $ZnO$ en la corriente 25	$\frac{kg}{kg}$	$y_{36}$

Tabla A.9: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\omega_J^{25}$	Fracción de jarosita en la corriente 25	$\frac{kg}{kg}$	$y_{37}$
$W_{25}$	Flujo másico de la corriente 25	$\frac{kg}{hr}$	$y_{38}$
$\rho_{SZ}^{24}$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 24	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{39}$
$\rho_{AS}^{24}$	Concentración de $H_2SO_4$ en la corriente 24	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{40}$
$Q_{24}$	Flujo volumétrico de la corriente 24	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{41}$

Tabla A.10: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$Q_{23}$	Flujo volumétrico de la corriente 23	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{42}$
$\omega_{Hm}^{28}$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la corriente 28	$\frac{kg}{kg}$	$y_{43}$
$\omega_{Cn}^{28}$	Fracción de $ZnO$ en la corriente 28	$\frac{kg}{kg}$	$y_{44}$
$\omega_J^{28}$	Fracción de jarosita en la corriente 28	$\frac{kg}{kg}$	$y_{45}$
$W_{28}$	Flujo másico de la corriente 28	$\frac{kg}{hr}$	$y_{46}$

Tabla A.11: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\rho_{SF}^{26}$	Concentración de $Fe_2(SO_4)_3$ en la corriente 26	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{47}$
$\rho_{SF}^{26}$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 26	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{48}$
$\rho_{AS}^{26}$	Concentración de $H_2SO_4$ en la corriente 26	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{49}$
$Q_{26}$	Flujo volumétrico de la corriente 26	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{50}$
$W_{29}$	Flujo másico de la corriente 29	$\frac{kg}{hr}$	$y_{51}$

Tabla A.12: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$W_{30}$	Flujo másico de la corriente 30	$\frac{kg}{hr}$	$y_{52}$
$\omega_{Hm}^{33}$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la corriente 33	$\frac{kg}{kg}$	$y_{53}$
$\omega_{Cn}^{33}$	Fracción de $ZnO$ en la corriente 33	$\frac{kg}{kg}$	$y_{54}$
$\omega_J^{33}$	Fracción de jarosita en la corriente 33	$\frac{kg}{kg}$	$y_{55}$
$Q_{33}$	Flujo másico de la corriente 33	$\frac{kg}{hr}$	$y_{56}$

Tabla A.13: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\rho_{SF}^{32}$	Concentración de $Fe_2(SO_4)_3$ en la corriente 32	$\frac{kg}{m^3}$	y57
$\rho_{SZ}^{32}$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 32	$\frac{kg}{m^3}$	y58
$\rho_{AS}^{32}$	Concentración de $H_2SO_4$ en la corriente 32	$\frac{kg}{m^3}$	y59
$Q_{32}$	Flujo volumínico de la corriente 32	$\frac{m^3}{hr}$	y60
$\omega_{Hm}^{35}$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la corriente 35	$\frac{kg}{kg}$	y61

Tabla A.14: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\omega_{HF}^{35}$	Fracción de $ZnO$ en la corriente 35	$\frac{kg}{kg}$	y62
$\omega_J^{35}$	Fracción de jarosita en la corriente 35	$\frac{kg}{kg}$	y63
$W_{35}$	Flujo másico de la corriente 35	$\frac{kg}{hr}$	y64
$\rho_{SZ}^{34}$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 34	$\frac{kg}{m^3}$	y65
$Q_{34}$	Flujo volumínico de la corriente 34	$\frac{m^3}{hr}$	y66

Tabla A.15: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$Q_{27}$	Flujo volumínico de la corriente 27	$\frac{m^3}{hr}$	y67
$Q_{AS}^{16}$	Flujo volumínico de $H_2SO_4$ en la corriente 16	$\frac{m^3}{hr}$	y68
$Q_{12}$	Flujo volumínico de la corriente 12	$\frac{m^3}{hr}$	y69
$Q_{14}$	Flujo volumínico de la corriente 14	$\frac{m^3}{hr}$	y70
$Q_{31}$	Flujo volumínico de la corriente 31	$\frac{m^3}{hr}$	y71

Tabla A.16: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\rho_{AS}^{34}$	Concentración de $H_2SO_4$ en la corriente 34	$\frac{kg}{m^3}$	y72
$W_{36zn}$	Flujo másico de Zn en la corriente 36	$\frac{kg}{hr}$	y73

Tabla A.17: Notación para el método de solución para el proceso hidrometalúrgico convencional del zinc (continuación)

## Apéndice B

### Notación utilizada en el método de solución para el proceso acoplado utilizando hierro como reductor

A continuación se muestran las tablas correspondientes al modelo de solución para el proceso de hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor. A diferencia de la notación expresa en el apéndice anterior, aquí se muestran las variables utilizadas en los módulos correspondientes al proceso del despojo galvánico y la piroconversión.

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$W_1$	Flujo másico en la corriente 1	$\frac{kg}{hr}$	$W$
$X$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la corriente 1, 2 y 3	$\frac{kg}{kg}$	$X$
$Y$	Fracción de $ZnO$ en la corriente 1, 2 y 3	$\frac{kg}{kg}$	$Y$
$\rho_{SZ}^{Ea}$	Concentración de $ZnSO_4$ en el electrolito agotado	$\frac{kg}{m^3}$	$CSZEA$
$\rho_{AS}^{Ea}$	Concentración de $H_2SO_4$ en el electrolito agotado	$\frac{kg}{m^3}$	$CASEA$
$W_2$	Flujo másico en la corriente 2	$\frac{kg}{hr}$	$y_1$
$W_3$	Flujo másico en la corriente 3	$\frac{kg}{hr}$	$y_2$
$\omega_{Hm}^6$	Fracción de $Fe_2O_3$ en la corriente 6	$\frac{kg}{kg}$	$y_3$

Tabla B.1: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$W_6$	Flujo másico en la corriente 6	$\frac{kg}{hr}$	$y_4$
$\omega_{HF}^6$	Fracción de $Fe(OH)_3$ en la corriente 6	$\frac{kg}{kg}$	$y_5$
$\omega_{Cn}^6$	Fracción de $ZnO$ en la corriente 6	$\frac{kg}{kg}$	$y_6$
$\rho_{SZ}^5$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 5	$\frac{kg}{m^3}$	$y_7$
$Q_5$	Flujo volumínico en la corriente 5	$\frac{m^3}{hr}$	$y_8$

Tabla B.2: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$Q_4$	Flujo volumínico en la corriente 4	$\frac{m^3}{hr}$	$y_9$
$\omega_{Hm}^8$	Fracción másica de $Fe_2O_3$ en la corriente 8	$\frac{kg}{kg}$	$y_{10}$
$\omega_{Cn}^8$	Fracción másica de $ZnO$ en la corriente 8	$\frac{kg}{kg}$	$y_{11}$
$\omega_{HF}^8$	Fracción másica de $Fe(OH)_3$ en la corriente 8	$\frac{kg}{kg}$	$y_{12}$
$W_8$	Flujo másico en la corriente 8	$\frac{kg}{hr}$	$y_{13}$

Tabla B.3: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\omega_{Hm}^{11}$	Fracción másica de $Fe_2O_3$ en la corriente 11	$\frac{kg}{kg}$	$y_{14}$
$\omega_{Cn}^{11}$	Fracción másica de $ZnO$ en la corriente 11	$\frac{kg}{kg}$	$y_{15}$
$\omega_{HF}^{11}$	Fracción másica de $Fe(OH)_3$ en la corriente 11	$\frac{kg}{kg}$	$y_{16}$
$W_{11}$	Flujo másico en la corriente 11	$\frac{kg}{hr}$	$y_{17}$
$\rho_{SZ}^7$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 7	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{18}$

Tabla B.4: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\rho_{SZ}^{10}$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 10	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{19}$
$Q_7$	Flujo volumínico en la corriente 7	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{20}$
$Q_9$	Flujo volumínico en la corriente 9	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{21}$
$Q_{10}$	Flujo volumínico en la corriente 10	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{22}$
$\omega_{Hm}^{29}$	Fracción másica de $Fe_2O_3$ en la corriente 29	$\frac{kg}{kg}$	$y_{23}$

Tabla B.5: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var Maple
$\omega_{HF}^{29}$	Fracción másica de $Fe(OH)_3$ en la corriente 29	$\frac{kg}{kg}$	$y_{24}$
$\omega_{Cn}^{29}$	Fracción másica de $ZnO$ en la corriente 29	$\frac{kg}{kg}$	$y_{25}$
$W_{29}$	Flujo másico en la corriente 29	$\frac{kg}{hr}$	$y_{26}$
$Q_{31}$	Flujo voluminico en la corriente 31	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{27}$
$\rho_{SZ}^{30}$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 30	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{28}$

Tabla B.6: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$Q_{30}$	Flujo voluminico en la corriente 30	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{29}$
$\omega_{Hm}^{14}$	Fracción másica de $Fe_2O_3$ en la corriente 14	$\frac{kg}{kg}$	$y_{30}$
$\omega_{Cn}^{14}$	Fracción másica de $ZnO$ en la corriente 14	$\frac{kg}{kg}$	$y_{31}$
$W_{14}$	Flujo másico en la corriente 14	$\frac{kg}{hr}$	$y_{32}$
$\rho_{SF}^{13}$	Concentración de $Fe_2(SO_4)_3$ en la corriente 13	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{33}$

Tabla B.7: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\rho_{SZ}^{13}$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 13	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{34}$
$Q_{13}$	Flujo volumínico en la corriente 13	$\frac{m^3}{m^3}$	$y_{35}$
$Q_{12}$	Flujo volumínico en la corriente 12	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{36}$
$\rho_{SF}^{16}$	Concentración de $Fe_2(SO_4)_3$ en la corriente 16	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{37}$
$\rho_{SZ}^{16}$	Concentración de $ZnSO_4$ en la corriente 16	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{38}$

Tabla B.8: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$Q_{16}$	Flujo volumínico de la corriente 16	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{39}$
$\omega_{Hm}^{17}$	Fracción másica de $Fe_2O_3$ en la corriente 17	$\frac{kg}{kg}$	$y_{40}$
$\omega_{Cn}^{17}$	Fracción másica de $ZnO$ en la corriente 17	$\frac{kg}{kg}$	$y_{41}$
$W_{17}$	Flujo másico en la corriente 17	$\frac{kg}{hr}$	$y_{42}$
$\rho_{AS}^{16}$	Concentración de $H_2SO_4$ en la corriente 16	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{43}$

Tabla B.9: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

B. Notación utilizada en el método de solución para el proceso acoplado utilizando hierro como reductor 77

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\rho_{AS}^{13}$	Concentración de $H_2SO_4$ en la corriente 13	$\frac{kg}{m^3}$	y44
$Q_{15}$	Flujo volumétrico en la corriente 15	$\frac{m^3}{hr}$	y45
$\rho_{Fe^{3+}}^{A_{21}}$	Concentración del $Fe^{3+}$ en la corriente $A_{21}$	$\frac{kg}{m^3}$	y46
$A_{21}$	Flujo volumétrico de la corriente $A_{21}$	$\frac{m^3}{hr}$	y47
$\rho_{Fe^{III}}^{O_4^{C_1}}$	Concentración del $Fe^{III}$ en la corriente $O_4^{C_1}$	$\frac{kg}{m^3}$	y48

Tabla B.10: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$O_4^{C_1}$	Flujo volumétrico de la corriente $O_4^{C_1}$	$\frac{m^3}{hr}$	y49
$\rho_{AS}^{A_{21}}$	Concentración de $H_2SO_4$ en la corriente $A_{21}$	$\frac{kg}{m^3}$	y50
$S_{oFe}$	Flujo másico de $Fe^o$ en la corriente $S_o$	$\frac{kg}{hr}$	y51
$\rho_{Fe^{II}}^{O_2}$	Concentración de $Fe^{II}$ en la corriente $O_2$	$\frac{kg}{m^3}$	y52
$\rho_{Fe^{2+}}^{A_{10}}$	Concentración de $Fe^{2+}$ en la corriente $A_{10}$	$\frac{kg}{m^3}$	y53

Tabla B.11: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$O_2$	Flujo volumétrico de la corriente $O_2$	$\frac{m^3}{hr}$	y54
$A_{10}$	Flujo volumétrico de la corriente $A_{10}$	$\frac{m^3}{hr}$	y55
$G_2$	Flujo másico de $H_2$ en la corriente $G_2$	$\frac{kg}{hr}$	y56
$A_{12}$	Flujo volumétrico de la corriente $A_{12}$	$\frac{m^3}{hr}$	y57
$A_{16}$	Flujo volumétrico de la corriente $A_{16}$	$\frac{m^3}{hr}$	y58

Tabla B.12: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$A_{15}$	Flujo volumétrico de la corriente $A_{15}$	$\frac{m^3}{hr}$	y59
$S_1$	Flujo másico de la corriente $S_1$	$\frac{kg}{hr}$	y60
$\delta_{A_9}$	Densidad de la corriente $A_9$	$\frac{kg}{hr}$	y61
$O_4^{C_3}$	Flujo volumétrico de la corriente $O_4^{C_3}$	$\frac{kg}{hr}$	y62
%R	Porcentaje de recuperación en la cristalización	%	y63

Tabla B.13: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$S_2$	Flujo másico de $Fe_2O_3$ en la corriente $S_2$	$\frac{kg}{hr}$	$y_{64}$
$G_o$	Flujo molar de aire en la corriente $G_o$	$\frac{mol}{hr}$	$y_{65}$
$G_1$	Flujo molar de mezclas de gases en la corriente $G_1$	$\frac{mol}{hr}$	$y_{66}$
$A_{18}$	Flujo de agua en la corriente $A_{18}$	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{67}$
$A_9$	Flujo volumínico de la corriente $A_9$	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{68}$

Tabla B.14: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\rho_{Fe^{3+}}^{A_9}$	Concentración de $Fe^{3+}$ en la corriente $A_9$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{69}$
$W_{31}$	Flujo másico de $Zn$ en la corriente $W_{31}$	$\frac{kg}{hr}$	$y_{70}$
$\rho_{AS}^{Ea}$	Concentración de $H_2SO_4$ en el electrolito agotado	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{71}$
$\rho_{Fe^{3+}}^{A_{32}}$	Concentración de $Fe^{3+}$ en la corriente $A_{32}$	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{72}$
$A_{32}$	Flujo volumínico de la corriente $A_{32}$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{73}$

Tabla B.15: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\rho_{Fe^{III}}^{O_4^{C_2}}$	Concentración de $Fe^{III}$ en la corriente $O_4^{C_2}$	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{74}$
$\rho_{AS}^{A_{32}}$	Concentración de $H_2SO_4$ en la corriente $A_{32}$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{75}$
$\rho_{Fe^{3+}}^{A_3}$	Concentración de $Fe^{3+}$ en la corriente $A_3$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{76}$
$\rho_{Fe^{III}}^{O_4^{C_3}}$	Concentración de $Fe^{III}$ en la corriente $O_4^{C_3}$	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{77}$
$A_3$	Flujo volumínico de la corriente $A_3$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{78}$

Tabla B.16: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

Var. Modelo	Significado	Unidades	Var. Maple
$\rho_{AS}^{A_3}$	Concentración de $H_2SO_4$ en la corriente $A_3$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{79}$
$\rho_{Fe^{III}}^{O_4}$	Concentración de $Fe^{III}$ en la corriente $O_4$	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{80}$
$O_4$	Flujo volumínico de la corriente $O_4$	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{81}$
$O_4^{C_3}$	Flujo volumínico de la corriente $O_4^{C_2}$	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{82}$
$A_{19}$	Flujo volumínico de $H_2O$ en la corriente $A_{19}$	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{83}$

Tabla B.17: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando hierro como reductor (continuación)

# Apéndice C

## Notación utilizada en el método de solución para el proceso acoplado utilizando zinc como reductor

En las tablas que se presentan a continuación se muestra la notación utilizada en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor. Las variables mostradas en el apéndice anterior aplican para esta versión del proceso, con la diferencia de que se adicionan las variables utilizadas en los balances de materia correspondientes al zinc y sus compuestos.

Var. Modelo	Descripción	Unidades	Var. Maple
$\rho_{Zn^{2+}}^{A_{21}}$	Concentración de $Zn^{2+}$ en la corriente $A_{21}$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{83}$
$\rho_{Zn^{II}}^{O_4^{C_1}}$	Concentración de $Zn^{II}$ en la corriente $O_4^{C_1}$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{84}$
$\rho_{Zn^{2+}}^{A_{32}}$	Concentración de $Zn^{2+}$ en la corriente $A_{32}$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{85}$
$\rho_{Zn^{II}}^{O_4^{C_2}}$	Concentración de $Zn^{II}$ en la corriente $O_4^{C_2}$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{86}$
$\rho_{Zn^{2+}}^{A_3}$	Concentración de $Zn^{2+}$ en la corriente $A_3$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{87}$
$\rho_{Zn^{II}}^{O_4^{C_3}}$	Concentración de $Zn^{II}$ en la corriente $O_4^{C_3}$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{88}$
$\rho_{Zn^{II}}^{O_4}$	Concentración de $Zn^{II}$ en la corriente $O_4$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{89}$
$\rho_{Zn^{II}}^{O_2}$	Concentración de $Zn^{II}$ en la corriente $O_2$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{90}$
$\rho_{Zn^{2+}}^{A_{10}}$	Concentración de $Zn^{2+}$ en la corriente $A_{10}$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{91}$
$\rho_{Zn^{2+}}^{A_{15}}$	Concentración de $Zn^{2+}$ en la corriente $A_{15}$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{92}$
$\rho_{Zn^{2+}}^{A_9}$	Concentración de $Zn^{2+}$ en la corriente $A_9$	$\frac{kg}{m^3}$	$y_{93}$
$A_{19}$	Flujo volumínico de $H_2O$ en la corriente $A_{19}$	$\frac{m^3}{hr}$	$y_{94}$

Tabla C.1: Notación para el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor

# Apéndice D

## Diagrama de fases

A continuación se presenta el diagrama de fases  $H_2O$  vs  $FeCl_2$ , utilizado en la etapa de cristalización en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión empleando hierro y zinc como reductores.

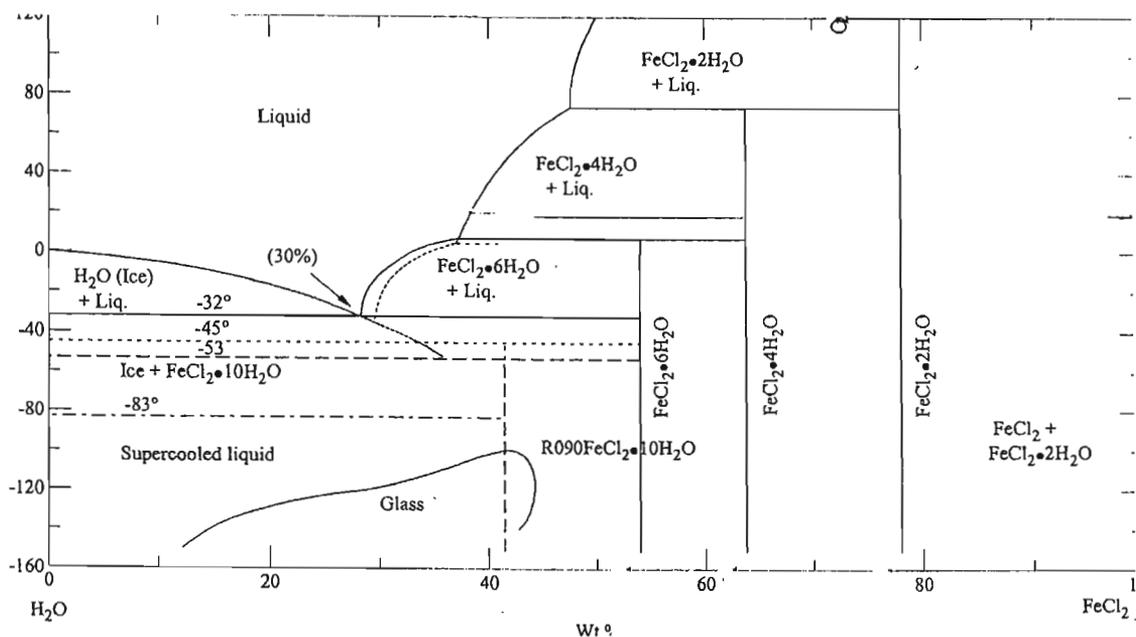


Figura D.1: Diagrama de fases  $H_2O$  vs  $FeCl_2$

# Apéndice E

## Tablas de control

Para el cargado se tienen las siguientes tablas de control complementarias.

<i>Especies</i>	<i>A21..kg/h</i>	<i>O2-C2..kg/h</i>	<i>A32..kg/h</i>	<i>O4-C2..kg/h</i>	<i>T. de Entrada</i>	<i>T. de Salida</i>	<i>Error</i>
<i>Fe2(SO4)3</i>	191.8633480	0	96.23819502	0	191.8633480	96.23819502	----
<i>H2SO4</i>	128.5702121	0	185.5559438	0	128.5702121	185.5559438	----
<i>ZnSO4</i>	942.3122080	0	964.3280374	0	942.3122080	964.3280374	----
<i>Fe(HA)3A3</i>	0	0	0	957.1159090	0	957.1159090	----
<i>Fe(HA)2A2</i>	0	4.463766500	0	0	4.463766500	0	----
<i>Zn(HA)2A2</i>	0	195.3067056	0	10.77692704	195.3067056	10.77692704	----
<i>Fe</i>	53.59120010	0.1855447884	26.88121739	26.89552748	53.77674489	53.77674487	0.2 10 <sup>-7</sup>
<i>Zn</i>	381.5792512	9.435733731	390.4943258	0.5206591022	391.0149849	391.0149849	0.
<i>SO4</i>	824.9326135	0	824.9326135	0	824.9326135	824.9326135	0.
----	----	----	----	----	----	----	----
<i>Concentración</i>	<i>A21..kg/m^3</i>	<i>O2-C2..kg/m^3</i>	<i>A32..kg/m^3</i>	<i>O4-C2..kg/m^3</i>	<i>S.I.</i>	$\Phi$	<i>A/O</i>
<i>Fe</i>	9.199283696	0.02388749194	4.614338632	3.462596290	1.7	0.7	0.75
<i>Zn</i>	65.50060045	1.214779542	67.03093194	0.06703093194	----	----	----
----	----	----	----	----	----	----	----
<i>Flujo</i>	<i>A21..m^3/h</i>	<i>O2-C2..m^3/h</i>	<i>A32..m^3/h</i>	<i>O4-C2..m^3/h</i>	----	----	----
<i>Volumétrico</i>	5.825584019	7.767445357	5.825584019	7.767445359	----	----	----

Figura E.1: Tabla de control del segundo tanque de cargo en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor.

<i>Especies</i>	<i>A32..kg/h</i>	<i>O2-C3..kg/h</i>	<i>A3..kg/h</i>	<i>O4..C3..kg/h</i>	<i>T. de Entrada</i>	<i>T. de Salida</i>	<i>Error</i>
<i>Fe2(SO4)3</i>	96.23819502	0	47.40267048	0	96.23819502	47.40267048	----
<i>H2SO4</i>	185.5559438	0	208.1314671	0	185.5559438	208.1314671	----
<i>ZnSO4</i>	964.3280374	0	986.3145512	0	964.3280374	986.3145512	----
<i>Fe(HA)3A3</i>	0	0	0	492.0274866	0	492.0274866	----
<i>Fe(HA)2A2</i>	0	4.463766500	0	0	4.463766500	0	----
<i>Zn(HA)2A2</i>	0	195.3067056	0	11.02263913	195.3067056	11.02263913	----
<i>Fe</i>	26.88121739	0.1855447884	13.24049656	13.82626562	27.06676218	27.06676218	0.
<i>Zn</i>	390.4943258	9.435733731	399.3975295	0.5325300405	399.9300595	399.9300595	0.
<i>SO4</i>	824.9326135	0	824.9326134	0	824.9326135	824.9326134	0.1 10 <sup>-6</sup>
----	----	----	----	----	----	----	----
<i>Concentración</i>	<i>A32..kg/m^3</i>	<i>O2-C3..kg/m^3</i>	<i>A3..kg/m^3</i>	<i>O4..C3..kg/m^3</i>	<i>S.I.</i>	$\Phi$	<i>A/O</i>
<i>Fe</i>	4.614338632	0.02388749194	2.272818745	1.780027407	1.7	0.7	0.75
<i>Zn</i>	67.03093194	1.214779542	68.55922569	0.06855922569	----	----	----
----	----	----	----	----	----	----	----
<i>Flujo</i>	<i>A32..m^3/h</i>	<i>O2-C3..m^3/h</i>	<i>A3..m^3/h</i>	<i>O4..C3..m^3/h</i>	----	----	----
<i>Volumétrico</i>	5.825584019	7.767445357	5.825584019	7.767445359	----	----	----

Figura E.2: Tabla de control del tercer tanque de cargo en el proceso hidrometalúrgico del zinc con implantación del despojo galvánico y la piroconversión utilizando zinc como reductor.

# Apéndice F

## Código del método de solución

```
> restart:
> with(codegen):
> with(LinearAlgebra):
> with(linalg):
> with(Spread):
> ZZ:=0.803373258252:
> FH:=0.6994330343:
Concentración de Sulfato de Zinc en el E.A. en kg/m3
> CSZEA:=150.0:
Concentración de Ácido Sulfúrico en el E.A. en kg/m3
> CASEA:=49.03:
Porcentaje de Fe
> PF:=8.0:
Fracciones de hematita ( X ) y zincita ( Y ) en la Calcina
> X:=(((PF/100)*F)/0.6994330343)/F:
> Y:=1000*(1/ZZ)/F:
> P:=X+Y=1:
Alimentación inicial de Calcina en kg/hr
> F:=solve(P,F):
Fracción de Fe en la hematita
> FH:=0.6994330343:
Fracción de O en la hematita
> OH:=1-FH:
Fracción de Zn en la zincita
> ZZ:=0.803373258252:
Fracción de Fe en el Hidroxido Ferrico
> FHF:=0.522573828864:
Fracción de Zn en el Sulfato de Zinc
> ZSZ:=0.404939305563:
Fracción de Fe en el Sulfato Ferrico
```

---

> FSF:=0.279319633849:  
Fracción de SO4 en el Ácido Sulfúrico

> SAS:=0.979445446939:  
Fracción de SO4 en el Sulfato de Zinc

> SSZ:=0.595060694437:  
Fracción de SO4 en el Sulfato Ferrico

> SSF:=0.720680366:  
Fracción de SO4 en Fe (3+) proveniente del sulfato férrico

> SF3:=SSF/FSF:  
Fracción de Sulfato Ferrico en Fe (3+)

> SFF3:=1/FSF:  
Fracción de SO4 en Zn (2+) proveniente de sulfato de zinc

> SZ2:=SSZ/ZSZ:  
Fracción de Sulfato de Zinc en Zn (2+)

> SZZ2:=1/ZSZ:  
Fracción de H en H2SO4

> HAS:=0.020554553:  
Fracción de Zn en Zn(HA)2A2

> ZZII:=0.04831239:  
Fracción de Zn(HA)2A2 en Zn (II)

> ZIIZ:=20.69862414:  
Fracción de Fe en Fe(HA)2A2

> FFII:=0.041566867:  
Fracción de Fe(HA)2A2 en Fe (II)

> FIIF:=1/0.041566867:  
Fracción de Fe en Fe(HA)3A3

> FFIII:=0.028100596:  
Fracción de Fe(HA)3A3 en Fe (III)

> FIIF:=1/0.028100596:  
Fracción de H en HCl

> HHCl:=0.027645178:  
Fracción de H en H2O

> HHO:=0.111901302:  
Fracción de O en H2O

> OHO:=0.888098698:  
Fracción de Cl en HCl

> CHCl:=0.972354822:  
Fracción de Cl en FeCl2

> CCF:=0.559402933:  
Fracción de Fe en FeCl2

> FCF:=0.440597067:  
Fracción de FeCl2 en Fe

> CFF:=1/FCF:

---

Fracción de Fe en FeCl<sub>2</sub>-4H<sub>2</sub>O  
> FCFT:=0.280900233:  
Fracción de H<sub>2</sub>O en FeCl<sub>2</sub>-4H<sub>2</sub>O  
> HOCFT:=0.362455509:  
Fracción de H en FeCl<sub>2</sub>-4H<sub>2</sub>O  
> HCFT:=0.040559243:  
Fracción de Cl en FeCl<sub>2</sub>-4H<sub>2</sub>O  
> CCFT:=0.356644258:  
Fracción de Fe en la Jarosita  
> FJ:=0.349227822165:  
Fracción de Amonio en la Jarosita  
> NJ:=0.0376001934353:  
Fracción de SO<sub>4</sub> en la Jarosita  
> SJ:=0.400467746541:  
Fracción de oxígeno en el aire  
> XOA:=0.21:  
Fracción de nitrógeno en el aire  
> XNA:=0.79:  
Peso Molecular del Oxígeno gaseoso  
> PMOG:=31.9988:  
Peso Molecular del Nitrógeno gaseoso  
> PMNG:=28.0134:  
Peso Molecular del Hierro en kg/kg-mol  
> PMF:=55.847:  
Peso Molecular del Zinc en kg/kg-mol  
> PMZn:=65.37:  
Peso Molecular del Cloruro de hidrógeno  
> PMHCl:=36.46097:  
Peso Molecular del Hidrógeno gaseoso en kg/kg-mol  
> PMh:=2.01594:  
Peso Molecular del Agua en Kg/Kg-mol  
> PMHO:=18.01534:  
Peso Molecular del Ácido Sulfúrico en kg/kg-mol  
> PMAS:=98.07754:  
Peso Molecular del Sulfato de Zinc en kg/kg-mol  
> PMSZ:=161.4316:  
Peso Molecular de la Zincita en kg/kg-mol  
> PMZ:=81.3694:  
Peso Molecular del Hidroxido Ferrico en kg/kg-mol  
> PMHF:=106.86911:  
Peso Molecular de la hematita en kg/kg-mol  
> PMH:=159.6922:  
Peso Molecular del Sulfato Ferrico en kg/kg-mol

---

> PMSF:=399.8788:  
Peso Molecular del Cloruro Ferroso en kg/kg-mol  
> PMCF:=126.753:  
Peso Molecular del Cloruro Ferroso Tetrahidratado en kg/kg-mol  
> PMCFT:=198.81436:  
Peso Molecular del Cloruro de Zinc en kg/kg-mol  
> PMCZ:=136.276:  
Fracción del FeCl<sub>2</sub> en FeCl<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O  
> CFCFT:=PMCF/PMCFT:  
Fracción de Zn en ZnCl<sub>2</sub>  
> ZCZ:=0.47968828:  
Fracción de Cl en ZnCl<sub>2</sub>  
> CCZ:=0.52031172:  
Fracción de ZnCl<sub>2</sub> en Zn (2+)  
> CZZ:=1/ZCZ:  
Eficiencia de la reacción de la hematita  
> RH:=0.90:  
Eficiencia de la reacción de la zincita  
> RZ:=0.9:  
Densidad del ácido sulfúrico en kg/m<sup>3</sup>  
> DAS:=1768.0:  
Densidad del amoniaco en kg/m<sup>3</sup>  
> DAM:=678.70:  
Densidad de la corriente A12 en kg/m<sup>3</sup>  
> DA12:=1388.0:  
Densidad de la corriente A15 en kg/m<sup>3</sup>  
> DA15:=1443.0:  
Densidad de la corriente O2 en kg/m<sup>3</sup>  
> DAO2:=285.60:  
Densidad de la corriente O4 en kg/m<sup>3</sup>  
> DAO4:=285.60:  
Factor de separación en DC Mod.1  
> fdc1:=0.78:  
Factor de separación en DC Mod.9  
> fdc9:=0.2:  
Relación acuoso-orgánico en el cargado  
> AOC:=1.5000:  
Relación acuoso-orgánico en el despojo  
> AOD:=3.0000:  
Indice estequiométrico  
> SI:=2.1000:  
Moles de Fe en exceso  
> phi:=SI-1;

Numero de ecuaciones

> n:=94:

Porcentaje en mol de HCl (v)

> beta:=0.33333:

Porcentaje en mol de H2O (v)

> alfa:=0.66667:

Valores iniciales del proceso hidrometalurgico del zinc  
con implantación del despojo galvánico y la priconversión utilizando  
Fe como elemento reductor.

Valores iniciales del módulo 1

> y[1,1]:=1150.0:

> y[2,1]:=350.00:

Valores iniciales del módulo 2

> y[3,1]:=0.0312:

> y[4,1]:=543.33:

> y[5,1]:=0.7817:

> y[6,1]:=0.1870:

> y[7,1]:=253.41:

> y[8,1]:=23.270:

> y[9,1]:=10.327:

Valores iniciales del módulo 3

> y[10,1]:=0.0037:

> y[11,1]:=0.0222:

> y[12,1]:=0.9740:

> y[13,1]:=20.93:

> y[14,1]:=0.0037:

> y[15,1]:=0.0222:

> y[16,1]:=0.9740:

> y[17,1]:=436.097:

> y[18,1]:=251.4171:

> y[19,1]:=251.4171:

> y[20,1]:=1.1687:

> y[21,1]:=1.2487:

> y[22,1]:=24.349:

Valores iniciales del módulo 4

> y[23,1]:=0.0199:

> y[24,1]:=0.860:

> y[25,1]:=0.119:

> y[26,1]:=232.0:

> y[27,1]:=50.0:

> y[28,1]:=190.0:

> y[29,1]:=11.0:

Valores iniciales del módulo 5

```
> y[30,1]:=0.1429:
> y[31,1]:=0.8570:
> y[32,1]:=1.143:
> y[33,1]:=67.84:
> y[34,1]:=147.93:
> y[35,1]:=11.77:
> y[36,1]:=11.49:
> y[37,1]:=1.30:
```

Valores iniciales del módulo 6

```
> y[38,1]:=150.0:
> y[39,1]:=0.28:
> y[40,1]:=0.14:
> y[41,1]:=0.85:
> y[42,1]:=0.11:
> y[43,1]:=44.93:
> y[44,1]:=56.65:
> y[45,1]:=0.28:
```

VALORES INICIALES DEL DESPOJO GALVÁNICO Y LA PIROCONVERSIÓN.

Valores iniciales CARGADO 1

```
> y[46,1]:=10.92:
> y[47,1]:=11.77:
> y[48,1]:=7.23:
> y[49,1]:=13.08:
> y[50,1]:=66.71:
> y[84,1]:=65.10:
> y[85,1]:=0.06:
```

Valores iniciales CARGADO 2

```
> y[72,1]:=9.0:
> y[73,1]:=11.00:
> y[74,1]:=6.0:
> y[75,1]:=68.0:
> y[82,1]:=6.20:
> y[86,1]:=68.40:
> y[87,1]:=0.05:
```

Valores iniciales CARGADO 3

```
> y[76,1]:=5.66:
> y[77,1]:=4.16:
> y[78,1]:=9.42:
> y[79,1]:=17.33:
> y[83,1]:=6.20:
> y[88,1]:=71.90:
> y[89,1]:=0.07:
```

Valor inicial MEZCLADOR 1

> y[80,1]:=5.98:

> y[81,1]:=18.8:

> y[90,1]:=0.06:

Valores iniciales DESPOJO GALVANICO

> y[51,1]:=111.55:

> y[52,1]:=0.02:

> y[53,1]:=266.0:

> y[54,1]:=13.0:

> y[55,1]:=24.0:

> y[56,1]:=250.0:

> y[91,1]:=5.20:

> y[92,1]:=2.50:

Valores iniciales DIVISOR DE CORRIENTE

> y[57,1]:=5.0:

> y[58,1]:=19.0:

Valores iniciales CRISTALIZACIÓN-FILTRADO-SECADO

> y[59,1]:=14000.0:

> y[60,1]:=450.0:

> y[61,1]:=670.0:

> y[62,1]:=414.0:

> y[63,1]:=3.73:

> y[93,1]:=2.80:

Valor inicial del PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN

> y[64,1]:=184.0:

Valores iniciales PIROCONVERSIÓN

> y[65,1]:=2.74:

> y[66,1]:=13.0:

> y[67,1]:=41.0:

Valores iniciales MEZCLADOR 2

> y[68,1]:=24.0:

> y[69,1]:=250.0:

> y[94,1]:=2.50:

Valor inicial ELECTROLITO

> y[70,1]:=10000.0:

> y[71,1]:=60.0:

E C U A C I O N E S

Divisor de corriente Mod.1

> G[1]:=F-y[1]-y[2]:

> G[2]:=y[1]-fdc1\*F:

Tanque de lixiviación neutra Mod.2

> G[3]:=X\*y[1]\*FH+y[10]\*y[13]\*FH+y[12]\*y[13]\*FHF+y[23]\*y[26]\*FH+y[24]\*y[26]\*FHF  
-y[3]\*y[4]\*FH-y[5]\*y[4]\*FHF:

> G[4]:=Y\*y[1]\*ZZ+CSZEA\*y[9]\*ZSZ+y[11]\*y[13]\*ZZ+y[18]\*y[20]\*ZSZ+y[25]\*y[26]\*ZZ+

```

y[28]*y[29]*ZSZ-y[6]*y[4]*ZZ-y[7]*y[8]*ZSZ:
> G[5]:=CASEA*y[9]*SAS+CSZEA*y[9]*SSZ+y[18]*y[20]*SSZ+y[28]*y[29]*SSZ+y[27]*
y[29]*SAS-y[7]*y[8]*SSZ:
> G[6]:=y[3]+y[5]+y[6]-1:
> G[7]:=y[9]+y[20]+y[29]-y[8]:
> G[8]:=y[3]*y[4]-(1-RH)*X*y[1]-(1-RH)*y[10]*y[13]-(1-RH)*y[23]*y[26]:
> G[9]:=y[6]*y[4]-(1-RZ)*Y*y[1]-(1-RZ)*y[11]*y[13]-(1-RZ)*y[25]*y[26]:
Tanque de lixiviación neutra Mod.3
> G[10]:=y[3]*y[4]*FH+y[5]*y[4]*FHF-y[10]*y[13]*FH-y[12]*y[13]*FHF-y[14]*y[17]*FH-
y[16]*y[17]*FHF:
> G[11]:=y[6]*y[4]*ZZ+y[7]*y[8]*ZSZ+CSZEA*y[21]*ZSZ-y[11]*y[13]*ZZ-y[18]*y[20]*ZSZ
-y[15]*y[17]*ZZ-y[19]*y[22]*ZSZ:
> G[12]:=y[7]*y[8]*SSZ+CSZEA*y[21]*SSZ+CASEA*y[21]*SAS-y[18]*y[20]*SSZ-y[19]*
y[22]*SSZ:
> G[13]:=y[10]+y[11]+y[12]-1:
> G[14]:=y[18]-y[19]:
> G[15]:=y[8]+y[21]-y[20]-y[22]:
> G[16]:=y[10]*y[13]+y[14]*y[17]-(1-RH)*y[3]*y[4]:
> G[17]:=y[11]*y[13]+y[15]*y[17]-(1-RZ)*y[6]*y[4]:
> G[18]:=y[10]-y[14]:
> G[19]:=y[11]-y[15]:
> G[20]:=y[12]-y[16]:
> G[21]:=y[20]-0.048*y[22]:
> G[22]:=y[13]-0.048*y[17]:
Tanque de lixiviación neutra Mod.4
> G[23]:=X*y[2]*FH+y[76]*y[78]-y[23]*y[26]*FH-y[24]*y[26]*FHF:
> G[24]:=Y*y[2]*ZZ+y[88]*y[78]-y[28]*y[29]*ZSZ-y[25]*y[26]*ZZ:
> G[25]:=y[76]*y[78]*SF3+y[79]*y[78]*SAS+y[88]*y[78]*SZ2-y[28]*y[29]*SSZ-y[27]*y[29]
*SAS:
> G[26]:=y[23]+y[24]+y[25]-1:
> G[27]:=y[78]-y[29]:
> G[28]:=y[23]*y[26]-(1-RH)*X*y[2]:
> G[29]:=y[25]*y[26]-(1-RH)*Y*y[2]:
Tanque de lixiviación ácida-caliente Mod.5
> G[30]:=y[16]*y[17]*FHF+y[14]*y[17]*FH+y[40]*y[42]*FH+y[37]*y[39]*FSF-y[33]*y[35]
*FSF-y[30]*y[32]*FH:
> G[31]:=y[36]*CSZEA*ZSZ+y[15]*y[17]*ZZ+y[41]*y[42]*ZZ+y[38]*y[39]*ZSZ-y[34]*y[35]
*ZSZ-y[31]*y[32]*ZZ:
> G[32]:=y[30]+y[31]-1:
> G[33]:=y[30]*y[32]-(1-RH)*y[14]*y[17]-(1-RH)*y[40]*y[42]:
> G[34]:=y[31]*y[32]-(1-RZ)*y[15]*y[17]-(1-RZ)*y[41]*y[42]:
> G[35]:=y[36]+y[39]-y[35]:
> G[36]:=y[36]-((PMAS)*((1.5*y[16]*y[17]/PMHF)+(3*y[14]*y[17]/PMH)+(y[15]*y[17]/

```

PMZ))/CASEA:

> G[44]:=y[37]\*y[39]\*SSF+y[38]\*y[39]\*SSZ+y[43]\*y[39]\*SAS+y[36]\*CASEA\*SAS+y[36]\*CSZEA\*SSZ-y[33]\*y[35]\*SSF-y[34]\*y[35]\*SSZ-y[44]\*y[35]\*SAS:

Tanque de lixiviación ácida-caliente Mod. 6

> G[37]:=y[30]\*y[32]\*FH-y[40]\*y[42]\*FH-y[37]\*y[39]\*FSF:

> G[38]:=y[45]\*CSZEA\*ZSZ+y[31]\*y[32]\*ZZ-y[41]\*y[42]\*ZZ-y[38]\*y[39]\*ZSZ:

> G[39]:=y[40]+y[41]-1:

> G[40]:=y[40]\*y[42]-(1-RH)\*y[30]\*y[32]:

> G[41]:=y[41]\*y[42]-(1-RZ)\*y[31]\*y[32]:

> G[42]:=y[45]-y[39]:

> G[43]:=y[45]\*CSZEA\*SSZ+y[45]\*CASEA\*SAS-y[37]\*y[39]\*SSF-y[38]\*y[39]\*SSZ-y[43]\*y[39]\*SAS:

> G[45]:=y[45]-((PMAS)\*((3\*y[14]\*y[17]/PMH)+(y[15]\*y[17]/PMZ)))/CASEA:

Cargado 1 Mod.7

> G[46]:=y[33]\*y[35]\*FSF+(1/3)\*y[52]\*y[54]-y[46]\*y[47]-y[48]\*y[49]:

> G[84]:=y[34]\*y[35]\*ZSZ+(1/3)\*y[91]\*y[54]-y[84]\*y[47]-y[85]\*y[49]:

> G[47]:=y[44]\*y[35]\*SAS+y[33]\*y[35]\*SSF+y[34]\*y[35]\*SSZ-y[50]\*y[47]\*SAS-y[46]\*y[47]\*SF3-y[84]\*y[47]\*SZ2:

> G[48]:=y[47]-AOC\*y[49]:

> G[49]:=y[35]-y[47]:

> G[50]:=y[48]+0.014\*y[46]^2-0.815\*y[46]:

> G[85]:=y[85]-0.001\*y[84]:

Cargado 2 Mod.13

> G[72]:=y[46]\*y[47]+(1/3)\*y[52]\*y[54]-y[72]\*y[73]-y[74]\*y[82]:

> G[86]:=y[84]\*y[47]+(1/3)\*y[91]\*y[54]-y[86]\*y[73]-y[87]\*y[82]:

> G[73]:=y[46]\*y[47]\*SF3+y[50]\*y[47]\*SAS+y[84]\*y[47]\*SZ2-y[72]\*y[73]\*SF3-y[75]\*y[73]\*SAS-y[86]\*y[73]\*SZ2:

> G[82]:=y[73]-AOC\*y[82]:

> G[74]:=y[47]-y[73]:

> G[75]:=y[74]+0.014\*y[72]^2-0.815\*y[72]:

> G[87]:=y[87]-0.001\*y[86]:

Cargado 3 Mod.14

> G[76]:=y[72]\*y[73]+(1/3)\*y[52]\*y[54]-y[76]\*y[78]-y[77]\*y[83]:

> G[88]:=y[86]\*y[73]+(1/3)\*y[91]\*y[54]-y[88]\*y[78]-y[89]\*y[83]:

> G[77]:=y[72]\*y[73]\*SF3+y[75]\*y[73]\*SAS+y[86]\*y[73]\*SZ2-y[76]\*y[78]\*SF3-y[79]\*y[78]\*SAS-y[88]\*y[78]\*SZ2:

> G[83]:=y[78]-AOC\*y[83]:

> G[78]:=y[73]-y[78]:

> G[79]:=y[77]+0.014\*y[76]^2-0.815\*y[76]:

> G[89]:=y[89]-0.001\*y[88]:

Mezclador de corrientes Mod.16

> G[80]:=y[80]\*y[81]-y[77]\*y[83]-y[74]\*y[82]-y[48]\*y[49]:

> G[90]:=y[90]\*y[81]-y[89]\*y[83]-y[87]\*y[82]-y[85]\*y[49]:

```

> G[81]:=y[81]-y[49]-y[82]-y[83]:
Despojo galvánico Mod.8
> G[51]:=y[80]*y[81]+y[69]*y[68]-y[52]*y[54]-y[53]*y[55]:
> G[91]:=y[90]*y[81]+y[94]*y[68]-y[91]*y[54]-y[92]*y[55]+y[51]:
> G[52]:=y[55]-AOD*y[54]:
> G[53]:=y[52]-0.0001*y[53]:
> G[54]:=(phi)*(y[51])/PMZn-(1+phi)*y[56]/PMh:
> G[55]:=y[51]-(1+phi)*(y[72]*y[73]*SFF3/PMSF)*PMZn:
> G[56]:=y[81]-y[54]:
> G[92]:=y[91]+0.8364*y[92]^2-1.4672*y[92]-6.8641:
Divisor de corriente Mod.9
> G[57]:=y[55]-y[57]-y[58]:
> G[58]:=y[57]-fdc9*y[55]:
Cristalización Mod.10
> G[59]:=y[61]-((100-W[T])/100)*(y[61]+y[62]):
> G[60]:=y[57]*DA12*XA40-XA20*(y[59]+y[62]):
> G[61]:=y[57]*DA12-y[59]-y[61]-y[62]:
> G[62]:=y[53]*y[57]-F20*(y[59]/DA15)-y[60]*FCFT:
> G[93]:=y[92]*y[57]-y[93]*y[59]/DA15:
Porcentaje de recuperación
> G[63]:=y[63]-(y[60]*FCFT/(y[53]*y[57]))*100:
Piroconversión Mod.11
> G[64]:=y[60]*FCFT-y[64]*FH:
> G[65]:=y[60]*HCFT+y[67]*HHO-y[66]*beta*PMHCl*HHCl-y[66]*alfa*PMHO*HHO:
> G[66]:=y[65]*XOA*PMOG+y[67]*OHO-y[64]*OH:
> G[67]:=y[60]*CCFT-y[66]*beta*PMHCl*CHCl:
Mezclador de corrientes Mod.12
> G[68]:=y[59]/DA15+y[58]-y[68]:
> G[69]:=F20*y[59]/DA15+y[53]*y[58]-y[69]*y[68]:
> G[94]:=y[92]*y[58]+y[93]*y[59]/DA15-y[94]*y[68]:
Electrolisis Mod. 17
> G[70]:=y[19]*y[22]*ZSZ-CSZEA*ZSZ*(y[9]+y[21]+y[36]+y[45])-y[70]-y[51]:
> G[71]:=y[19]*y[22]*SSZ-(y[9]+y[21]+y[36]+y[45])*(CSZEA*SSZ+y[71]*SAS):
M E T O D O D E S O L U C I Ó N
(Newton-Raphson)
Procedimiento 1, estimación del error inicial.
> AA:=vector([seq(G[k],k=1..n)]):
> i:=1:
> AA1:=eval(jacobian(AA,[seq(y[k],k=1..n)]),[seq(y[k]=y[k,i],k=1..n)]):
> Ss[i]:=det(AA1):
> AA2:=inverse(AA1):
> AA3:=eval(array([seq([G[k]],k=1..n)]),[seq(y[k]=y[k,i],k=1..n)]):
> AA4:=multiply(AA2,AA3):

```

```

> AA5:=array([seq([y[k,i]],k=1..n)]):
> AA6:=scalarmul(AA4,-1):
> AA7:=matadd(AA5,AA6):
> for t from 1 to n do
> y[t,i+1]:=(AA7[t,1])
> od:
> Ee[i]:=abs(sqrt(sum('(y[k,i+1]-y[k,i])^2','k'=1..n)));
Segundo procedimiento, búsqueda de las raíces solución.
> for u from 2 by 1 while(abs(sqrt((sum('(y[k,u]-y[k,u-1])^2','k'=1..n))))>1.0E-3) do
> BB1:=eval(jacobian(AA,[seq(y[k],k=1..n)],[seq(y[k]=y[k,u],k=1..n)]);
> Ss[u]:=det(BB1);
> BB2:=inverse(BB1);
> BB3:=eval(array([seq([G[k]],k=1..n)],[seq(y[k]=y[k,u],k=1..n)]);
> BB4:=multiply(BB2,BB3);
> BB5:=array([seq([y[k,u]],k=1..n)]);
> BB6:=scalarmul(BB4,-1);
> BB7:=matadd(BB5,BB6);
> for t from 1 to n do
> y[t,u+1]:=(BB7[t,1]);
> od:
> Ee[u]:=abs(sqrt(sum('(y[k,u+1]-y[k,u])^2','k'=1..n)));
> od:
Error en la etapa final.
> Ee[u-1];
S O L U C I Ó N
> p:=8:
> q:=19:
> M:=array(1..u+1,1..p,1..q):Ee[0]:='—':Ss[0]:='—':
> B:=matrix(u+1,p):
> for v from 1 to q do
> M[1,1,v]:='Iteración':
> B[1,1]:=M[1,1,v]:
> M[1,p-1,v]:='Error':
> B[1,p-1]:=M[1,p-1,v]:
> M[1,p,v]:='Det':
> B[1,p]:=M[1,p,v]:
> for k from 1 to n-(n-5) do
> M[1,k+1,v]:=y[k+5*(v-1)]:
> B[1,k+1]:=M[1,k+1,v]:
> for h from 2 to u+1 do
> M[h,1,v]:=h-2:
> B[h,1]:=M[h,1,v]:
> M[h,k+1,v]:=y[k+5*(v-1),h-1]:

```

```

> B[h,k+1]:=M[h,k+1,v]:
> M[h,p-1,v]:=Ee[h-2]:
> B[h,p-1]:=M[h,p-1,v]:
> M[h,p,v]:=Ss[h-2]:
> B[h,p]:=M[h,p,v]:
> od:od:print(B):od:
> M23:=matrix(8,8):
> for i from 1 to 8 do
> for j from 1 to 8 do
> M23[i,j]:=‘—’:od:od:
> M23[1,1]:=‘CZn-A1’:M23[1,2]:=‘CZn-A3’:M23[1,3]:=‘CZn-O4’:M23[1,4]:=‘CZn-O2’:
M23[1,5]:=‘CZn-A9’:M23[1,6]:=‘CZn-A10’:M23[1,7]:=‘CAS-A1’:M23[1,8]:=‘CAS-A3’:
> M23[2,1]:=y[34,u]*ZSZ:M23[2,2]:=y[88,u]:M23[2,3]:=y[90,u]:M23[2,4]:=y[91,u]:
M23[2,5]:=y[92,u]:M23[2,6]:=y[94,u]:M23[2,7]:=y[44,u]:M23[2,8]:=y[79,u]:
> M23[3,1]:=‘CFe-A1’:M23[3,2]:=‘CFe-A3’:M23[3,3]:=‘CFe-O4’:M23[3,4]:=‘CFe-O2’:
M23[3,5]:=‘CFe-A9’:M23[3,6]:=‘CFe-A10’:M23[3,7]:=‘CZn-Q10’:
> M23[4,1]:=y[33,u]*FSF:M23[4,2]:=y[76,u]:M23[4,3]:=y[80,u]:M23[4,4]:=y[52,u]:
M23[4,5]:=y[53,u]:M23[4,6]:=y[69,u]:M23[4,7]:=y[19,u]*ZSZ:
> M23[5,1]:=‘O2’:M23[5,2]:=‘A10’:M23[5,3]:=‘A9’:M23[5,4]:=‘Q10’:M23[5,5]:=‘Q9’:
> M23[6,1]:=y[54,u]:M23[6,2]:=y[55,u]:M23[6,3]:=y[68,u]:M23[6,4]:=y[22,u]:
M23[6,5]:=y[9,u]:
> M23[7,1]:=‘hematita’:M23[7,2]:=‘Zincita’:M23[7,3]:=‘Calcina’:M23[7,4]:=‘Oxigeno’:
M23[7,5]:=‘Nitrogeno’:M23[7,6]:=‘A18’:M23[7,7]:=‘A19’:M23[7,8]:=‘Zn’:
> M23[8,1]:=X*F:M23[8,2]:=Y*F:M23[8,3]:=F:M23[8,4]:=y[65,u]*XOA*PMOG:
M23[8,5]:=y[65,u]*XNA*PMNG:M23[8,6]:=y[67,u]:M23[8,7]:=y[84,u]:M23[8,8]:=y[51,u]:
> print(M23):
> o:=CreateSpreadsheet(oo):
> SetMatrix(oo,M23):
> SetSelection(oo,8,1,1,8):
> M1:=matrix(8,7):M1[1,1]:=‘Especies’:M1[1,2]:=‘E-1..kg/h’:M1[1,3]:=‘S-2..kg/h’:
M1[1,4]:=‘S-3..kg/h’:
> M1[2,1]:=‘Fe2O3’:M1[2,2]:=F*X:M1[2,3]:=X*y[1,u]:M1[2,4]:=X*y[2,u]:
> M1[3,1]:=‘ZnO’:M1[3,2]:=F*Y:M1[3,3]:=Y*y[1,u]:M1[3,4]:=Y*y[2,u]:
> M1[4,1]:=‘Fe’:M1[4,2]:=M1[2,2]*FH:M1[4,3]:=M1[2,3]*FH:M1[4,4]:=M1[2,4]*FH:
> M1[5,1]:=‘Zn’:M1[5,2]:=M1[3,2]*ZZ:M1[5,3]:=M1[3,3]*ZZ:M1[5,4]:=M1[3,4]*ZZ:
> for i from 6 to 8 do
> for j from 1 to 7 do
> M1[i,j]:=‘—’:od:od:
> M1[7,1]:=‘Flujo’:M1[7,2]:=‘E-1..kg/h’:M1[7,3]:=‘S-2..kg/h’:M1[7,4]:=‘S-3..kg/h’:
M1[7,6]:=‘Factor.de.Separación’:
> M1[8,1]:=‘Másico.total’:M1[8,2]:=F:M1[8,3]:=y[1,u]:M1[8,4]:=y[2,u]:M1[8,6]:=fdc1:
> M1[1,5]:=‘T. de Entrada’:
> M1[1,6]:=‘T. de Salida’:

```

```

> for t from 2 to 5 do
> M1[t,5]:=sum('M1[t,s]', 's'=2);
> M1[t,6]:=sum('M1[t,s]', 's'=3..4);
> od:
> for k from 1 to 5 do
> if k = 1 then
> M1[k,7]:='Error':
> else
> if k < 4 then
> M1[k,7]:='—':
> else
> M1[k,7]:=sum('M1[k,s]', 's'=2)-sum('M1[k,s]', 's'=3..4):
> end if:
> end if:
> od;
> M2:=matrix(14,12):M2[1,1]:='Especies':M2[1,2]:='E-2..kg/h':M2[1,3]:='E-4..kg/h':
M2[1,4]:='E-7..kg/h':M2[1,5]:='E-8..kg/h':M2[1,6]:='E-29..kg/h':M2[1,7]:='E-30..kg/h':
M2[1,8]:='S-5..kg/h':M2[1,9]:='S-6..kg/h':
> M2[2,1]:='Fe2O3':M2[2,2]:=X*y[1,u]:M2[2,3]:=0:M2[2,4]:=0:M2[2,5]:=y[10,u]*y[13,u]:
M2[2,6]:=y[23,u]*y[26,u]:M2[2,7]:=0:M2[2,8]:=0:M2[2,9]:=y[3,u]*y[4,u]:
> M2[3,1]:='ZnO':M2[3,2]:=Y*y[1,u]:M2[3,3]:=0:M2[3,4]:=0:M2[3,5]:=y[11,u]*y[13,u]:
M2[3,6]:=y[25,u]*y[26,u]:M2[3,7]:=0:M2[3,8]:=0:M2[3,9]:=y[6,u]*y[4,u]:
> M2[4,1]:='Fe(OH)3':M2[4,2]:=0:M2[4,3]:=0:M2[4,4]:=0:M2[4,5]:=y[12,u]*y[13,u]:
M2[4,6]:=y[24,u]*y[26,u]:M2[4,7]:=0:M2[4,8]:=0:M2[4,9]:=y[5,u]*y[4,u]:
> M2[5,1]:='ZnSO4':M2[5,2]:=0:M2[5,3]:=CSZEA*y[9,u]:M2[5,4]:=y[18,u]*y[20,u]:
M2[5,5]:=0:M2[5,6]:=0:M2[5,7]:=y[28,u]*y[29,u]:M2[5,8]:=y[7,u]*y[8,u]:M2[5,9]:=0:
> M2[6,1]:='H2SO4':M2[6,2]:=0:M2[6,3]:=CASEA*y[9,u]:M2[6,4]:=0:M2[6,5]:=0:M2[6,6]:=0:
M2[6,7]:=y[27,u]*y[29,u]:M2[6,8]:=0:M2[6,9]:=0:
> M2[7,1]:='Fe':M2[7,2]:=M2[2,2]*FH:M2[7,3]:=0:M2[7,4]:=0:M2[7,5]:=M2[2,5]*FH+
M2[4,5]*FHF:M2[7,6]:=M2[2,6]*FH+M2[4,6]*FHF:M2[7,7]:=0:M2[7,8]:=0:M2[7,9]:=M2[2,9]
*FH+M2[4,9]*FHF:
> M2[8,1]:='Zn':M2[8,2]:=M2[3,2]*ZZ:M2[8,3]:=M2[5,3]*ZSZ:M2[8,4]:=M2[5,4]*ZSZ:
M2[8,5]:=M2[3,5]*ZZ:M2[8,6]:=M2[3,6]*ZZ:M2[8,7]:=M2[5,7]*ZSZ:M2[8,8]:=M2[5,8]*ZSZ:
M2[8,9]:=M2[3,9]*ZZ:
> M2[9,1]:='SO4':M2[9,2]:=0:M2[9,3]:=M2[5,3]*SSZ+M2[6,3]*SAS:M2[9,4]:=M2[5,4]*SSZ:
M2[9,5]:=0:M2[9,6]:=0:M2[9,7]:=M2[5,7]*SSZ+M2[6,7]*SAS:M2[9,8]:=M2[5,8]*SSZ:
M2[9,9]:=0:
> for i from 10 to 14 do
> for j from 1 to 12 do
> M2[i,j]:='—':od:od:
> M2[11,1]:='Flujo':M2[11,2]:='E-2..kg/h':M2[11,3]:='E-8..kg/h':M2[11,4]:='E-29..kg/h':
M2[11,5]:='S-6..kg/h':M2[11,7]:='Flujo':M2[11,8]:='E-4..m^3':M2[11,9]:='E-7..m^3/h':
M2[11,10]:='E-30..m^3':M2[11,11]:='S-5..m^3/h':

```

```

> M2[12,1]:=‘Másico.total’:M2[12,2]:=y[1,u]:M2[12,3]:=y[13,u]:M2[12,4]:=y[26,u]:
M2[12,5]:=y[4,u]:
M2[12,7]:=‘Volumétrico’:M2[12,8]:=y[9,u]:M2[12,9]:=y[20,u]:M2[12,10]:=y[29,u]:
M2[12,11]:=y[8,u]:
> M2[1,10]:=‘T. de Entrada’:
> M2[1,11]:=‘T. de Salida’:
> for t from 2 to 9 do
> M2[t,10]:=sum(‘M2[t,s]’,’s’=2..7);
> M2[t,11]:=sum(‘M2[t,s]’,’s’=8..9);
> od:
> for k from 1 to 9 do
> if k = 1 then
> M2[k,12]:=‘Error’:
> else
> if k < 7 then
> M2[k,12]:=‘—’:
> else
> M2[k,12]:=sum(‘M2[k,s]’,’s’=2..7)-sum(‘M2[k,s]’,’s’=8..9):
> end if:
> end if:
> od;
> M22:=matrix(9,5):M22[1,1]:=‘Fracción.masa’:M22[1,2]:=‘E-2..kg/kg’:
M22[1,3]:=‘E-8..kg/kg’:M22[1,4]:=‘E-29..kg/kg’:M22[1,5]:=‘S-6..kg/kg’:
> M22[2,1]:=‘Fe2O3’:M22[2,2]:=X:M22[2,3]:=y[10,u]:M22[2,4]:=y[23,u]:
M22[2,5]:=y[3,u]:
> M22[3,1]:=‘Fe(OH)3’:M22[3,2]:=0:M22[3,3]:=y[12,u]:M22[3,4]:=y[24,u]:
M22[3,5]:=y[5,u]:
> M22[4,1]:=‘ZnO’:M22[4,2]:=Y:M22[4,3]:=y[11,u]:M22[4,4]:=y[25,u]:
M22[4,5]:=y[6,u]:
> M22[5,1]:=sum(‘X[s]’,’s’=1..m’):M22[5,2]:=sum(‘M22[s,2]’,’s’=2..4’):
M22[5,3]:=sum(‘M22[s,3]’,’s’=2..4’):M22[5,4]:=sum(‘M22[s,4]’,’s’=2..4’):
M22[5,5]:=sum(‘M22[s,5]’,’s’=2..4’):
> for j from 1 to 5 do
> M22[6,j]:=‘—’:od:
> M22[7,1]:=‘Concentración’:M22[7,2]:=‘E-4..kg/m^3’:M22[7,3]:=‘E-7..kg/m^3’:
M22[7,4]:=‘E-30..kg/m^3’:M22[7,5]:=‘S-5..kg/m^3’:
> M22[8,1]:=‘ZnSO4’:M22[8,2]:=CSZEA:M22[8,3]:=y[18,u]:M22[8,4]:=y[28,u]:
M22[8,5]:=y[7,u]:
> M22[9,1]:=‘H2SO4’:M22[9,2]:=CASEA:M22[9,3]:=0:M22[9,4]:=y[27,u]:M22[9,5]:=0:
> M3:=matrix(14,11):M3[1,1]:=‘Especies’:M3[1,2]:=‘E-5..kg/h’:M3[1,3]:=‘E-6..kg/h’:
M3[1,4]:=‘E-9..kg/h’:M3[1,5]:=‘S-7..kg/h’:M3[1,6]:=‘S-8..kg/h’:M3[1,7]:=‘S-10..kg/h’:
M3[1,8]:=‘S-11..kg/h’:
> M3[2,1]:=‘Fe2O3’:M3[2,2]:=0:M3[2,3]:=y[3,u]*y[4,u]:M3[2,4]:=0:M3[2,5]:=0:

```

```

M3[2,6]:=y[10,u]*y[13,u]:M3[2,7]:=0:M3[2,8]:=y[14,u]*y[17,u]:
> M3[3,1]:='ZnO':M3[3,2]:=0:M3[3,3]:=y[6,u]*y[4,u]:M3[3,4]:=0:M3[3,5]:=0:
M3[3,6]:=y[11,u]*y[13,u]:M3[3,7]:=0:M3[3,8]:=y[15,u]*y[17,u]:
> M3[4,1]:='Fe(OH)3':M3[4,2]:=0:M3[4,3]:=y[5,u]*y[4,u]:M3[4,4]:=0:M3[4,5]:=0:
M3[4,6]:=y[12,u]*y[13,u]:M3[4,7]:=0:M3[4,8]:=y[16,u]*y[17,u]:
> M3[5,1]:='ZnSO4':M3[5,2]:=y[7,u]*y[8,u]:M3[5,3]:=0:M3[5,4]:=CSZEA*y[21,u]:
M3[5,5]:=y[18,u]*y[20,u]:M3[5,6]:=0:M3[5,7]:=y[19,u]*y[22,u]:M3[5,8]:=0:
> M3[6,1]:='H2SO4':M3[6,2]:=0:M3[6,3]:=0:M3[6,4]:=CASEA*y[21,u]:M3[6,5]:=0:
M3[6,6]:=0:M3[6,7]:=0:M3[6,8]:=0:
> M3[7,1]:='Fe':M3[7,2]:=0:M3[7,3]:=M3[2,3]*FH+M3[4,3]*FHF:M3[7,4]:=0:M3[7,5]:=0:
M3[7,6]:=M3[2,6]*FH+M3[4,6]*FHF:M3[7,7]:=0:M3[7,8]:=M3[2,8]*FH+M3[4,8]*FHF:
> M3[8,1]:='Zn':M3[8,2]:=M3[5,2]*ZSZ:M3[8,3]:=M3[3,3]*ZZ:M3[8,4]:=M3[5,4]*ZSZ:
M3[8,5]:=M3[5,5]*ZSZ:M3[8,6]:=M3[3,6]*ZZ:M3[8,7]:=M3[5,7]*ZSZ:M3[8,8]:=M3[3,8]*ZZ:
> M3[9,1]:='SO4':M3[9,2]:=M3[5,2]*SSZ:M3[9,3]:=0:M3[9,4]:=M3[5,4]*SSZ+M3[6,4]*SAS:
M3[9,5]:=M3[5,5]*SSZ:M3[9,6]:=0:M3[9,7]:=M3[5,7]*SSZ:M3[9,8]:=0:
> for i from 10 to 14 do
> for j from 1 to 11 do
> M3[i,j]:='—':od:od:
> M3[11,1]:='Flujo':M3[11,2]:='E-6..kg/h':M3[11,3]:='S-8..kg/h':M3[11,4]:='S-11..kg/h':
M3[11,6]:='Flujo':M3[11,7]:='E-5..m^3':M3[11,8]:='E-9..m^3/h':M3[11,9]:='S-7..m^3':
M3[11,10]:='S-10..m^3/h':
> M3[12,1]:='Másico.total':M3[12,2]:=y[4,u]:M3[12,3]:=y[13,u]:M3[12,4]:=y[17,u]:
M3[12,6]:='Volumétrico':M3[12,7]:=y[8,u]:M3[12,8]:=y[21,u]:M3[12,9]:=y[20,u]:
M3[12,10]:=y[22,u]:
> M3[1,9]:='T. de Entrada':
> M3[1,10]:='T. de Salida':
> for t from 2 to 9 do
> M3[t,9]:=sum('M3[t,s]',s'=2..4);
> M3[t,10]:=sum('M3[t,s]',s'=5..8);
> od:
> for k from 1 to 9 do
> if k = 1 then
> M3[k,11]:='Error':
> else
> if k < 7 then
> M3[k,11]:='—':
> else
> M3[k,11]:=sum('M3[k,s]',s'=2..4)-sum('M3[k,s]',s'=5..8):
> end if:
> end if:
> od;
> M33:=matrix(9,5):M33[1,1]:='Fracción.masa':M33[1,2]:='E-6..kg/kg':
M33[1,3]:='S-8..kg/kg':M33[1,4]:='S-11..kg/kg':M33[1,5]:='—':

```

```

> M33[2,1]:='Fe2O3':M33[2,2]:=y[3,u]:M33[2,3]:=y[10,u]:M33[2,4]:=y[14,u]:
M33[2,5]:='—':
> M33[3,1]:='ZnO':M33[3,2]:=y[6,u]:M33[3,3]:=y[11,u]:M33[3,4]:=y[15,u]:
M33[3,5]:='—':
> M33[4,1]:='Fe(OH)3':M33[4,2]:=y[5,u]:M33[4,3]:=y[12,u]:M33[4,4]:=y[16,u]:
M33[4,5]:='—':
> M33[5,1]:=sum('X[s]', 's=1..m'):M33[5,2]:=sum('M33[s,2]', 's=2..4'):
M33[5,3]:=sum('M33[s,3]', 's=2..4'):M33[5,4]:=sum('M33[s,4]', 's=2..4'):
M33[5,5]:='—':
> for j from 1 to 5 do
> M33[6,j]:='—':od:
> M33[7,1]:='Concentración':M33[7,2]:='E-5..kg/m^3':M33[7,3]:='E-9..kg/m^3':
M33[7,4]:='S-7..kg/m^3':M33[7,5]:='S-10..kg/m^3':
> M33[8,1]:='ZnSO4':M33[8,2]:=y[7,u]:M33[8,3]:=CSZEA:M33[8,4]:=y[18,u]:
M33[8,5]:=y[19,u]:
> M33[9,1]:='H2SO4':M33[9,2]:=0:M33[9,3]:=CASEA:M33[9,4]:=0:M33[9,5]:=0:
> M7:=matrix(17,8):M7[1,1]:='Especies':M7[1,2]:='A1..kg/hr':M7[1,3]:='O2-C1..kg/hr':
M7[1,4]:='A21..kg/hr':M7[1,5]:='O4-C1..kg/hr':
> M7[2,1]:='Fe2(SO4)3':M7[2,2]:=y[33,u]*y[35,u]:M7[2,3]:=0:M7[2,4]:=y[46,u]*y[47,u]
*SFF3:M7[2,5]:=0:
> M7[3,1]:='H2SO4':M7[3,2]:=y[44,u]*y[35,u]:M7[3,3]:=0:M7[3,4]:=y[50,u]*y[47,u]:
M7[3,5]:=0:
> M7[4,1]:='ZnSO4':M7[4,2]:=y[34,u]*y[35,u]:M7[4,3]:=0:M7[4,4]:=y[84,u]*y[47,u]*SZZ2:
M7[4,5]:=0:
> M7[5,1]:='Fe(HA)3A3':M7[5,2]:=0:M7[5,3]:=0:M7[5,4]:=0:M7[5,5]:=y[48,u]*y[49,u]*FIIIF:
> M7[6,1]:='Fe(HA)2A2':M7[6,2]:=0:M7[6,3]:=(1/3)*y[52,u]*y[54,u]*FIIF:M7[6,4]:=0:
M7[6,5]:=0:
> M7[7,1]:='Zn(HA)2A2':M7[7,2]:=0:M7[7,3]:=(1/3)*y[91,u]*y[54,u]*ZIIZ:M7[7,4]:=0:
M7[7,5]:=y[85,u]*y[49,u]*ZIIZ:
> M7[8,1]:='Fe':M7[8,2]:=M7[2,2]*FSF:M7[8,3]:=M7[6,3]*FFII:M7[8,4]:=M7[2,4]*FSF:
M7[8,5]:=M7[5,5]*FFIII:
> M7[9,1]:='Zn':M7[9,2]:=M7[4,2]*ZSZ:M7[9,3]:=M7[7,3]*ZZII:M7[9,4]:=M7[4,4]*ZSZ:
M7[9,5]:=M7[7,5]*ZZII:
> M7[10,1]:='SO4':M7[10,2]:=M7[2,2]*SSF+M7[3,2]*SAS+M7[4,2]*SSZ:M7[10,3]:=0:
M7[10,4]:=M7[2,4]*SSF+M7[3,4]*SAS+M7[4,4]*SSZ:M7[10,5]:=0:
> for i from 11 to 17 do
> for j from 1 to 8 do
> M7[i,j]:='—':od:od:
> M7[12,1]:='Concentración':M7[12,2]:='A1..kg/m^3':M7[12,3]:='O2-C1..kg/m^3':
M7[12,4]:='A21..kg/m^3':M7[12,5]:='O4-C1..kg..m^3':M7[12,6]:='S.I.':M7[12,7]:='Phi':
M7[12,8]:='A/O':
> M7[13,1]:='Fe':M7[13,2]:=y[33,u]*FSF:M7[13,3]:=y[52,u]:M7[13,4]:=y[46,u]:
M7[13,5]:=y[48,u]:M7[13,6]:=SI:M7[13,7]:=phi:M7[13,8]:=AOC:

```

```

> M7[14,1]:=‘Zn’:M7[14,2]:=y[34,u]*ZSZ:M7[14,3]:=y[91,u]:M7[14,4]:=y[84,u]:
M7[14,5]:=y[85,u]:
> M7[16,1]:=‘Flujo’:M7[16,2]:=‘A1..m^3/h’:M7[16,3]:=‘O2-C1..m^3/h’:
M7[16,4]:=‘A21..m^3/h’:M7[16,5]:=‘O4-C1..m^3/h’:
> M7[17,1]:=‘Volumétrico’:M7[17,2]:=y[35,u]:M7[17,3]:=y[54,u]/3:M7[17,4]:=y[47,u]:
M7[17,5]:=y[49,u]:
> M7[1,6]:=‘T. de Entrada’:
> M7[1,7]:=‘T. de Salida’:
> for t from 2 to 10 do
> M7[t,6]:=sum(‘M7[t,s]’,’s’=2..3);
> M7[t,7]:=sum(‘M7[t,s]’,’s’=4..5);
> od:
> for k from 1 to 10 do
> if k = 1 then
> M7[k,8]:=‘Error’:
> else
> if k < 8 then
> M7[k,8]:=‘—’:
> else
> M7[k,8]:=sum(‘M7[k,s]’,’s’=2..3)-sum(‘M7[k,s]’,’s’=4..5):
> end if:
> end if:
> od:
> M8:=matrix(15,10):M8[1,1]:=‘Especies’:M8[1,2]:=‘O4..kg/hr’:M8[1,3]:=‘So..kg/hr’:
M8[1,4]:=‘A9..kg/hr’:M8[1,5]:=‘A10..kg/hr’:M8[1,6]:=‘O2..kg/hr’:M8[1,7]:=‘G2..kg/hr’:
> M8[2,1]:=‘Fe(HA)3A3’:M8[2,2]:=y[80,u]*y[81,u]*FIIF:M8[2,3]:=0:M8[2,4]:=0:
M8[2,5]:=0:M8[2,6]:=0:M8[2,7]:=0:
> M8[3,1]:=‘Fe(HA)2A2’:M8[3,2]:=0:M8[3,3]:=0:M8[3,4]:=0:M8[3,5]:=0:
M8[3,6]:=y[52,u]*y[54,u]*FIIF:M8[3,7]:=0:
> M8[4,1]:=‘Zn(HA)2A2’:M8[4,2]:=y[90,u]*y[81,u]*ZIIZ:M8[4,3]:=0:M8[4,4]:=0:
M8[4,5]:=0:M8[4,6]:=y[91,u]*y[54,u]*ZIIZ:M8[4,7]:=0:
> M8[5,1]:=‘FeCl2’:M8[5,2]:=0:M8[5,3]:=0:M8[5,4]:=y[69,u]*y[68,u]*CFE:
M8[5,5]:=y[53,u]*y[55,u]*CFE:M8[5,6]:=0:M8[5,7]:=0:
> M8[6,1]:=‘ZnCl2’:M8[6,2]:=0:M8[6,3]:=0:M8[6,4]:=y[94,u]*y[68,u]*CZZ:
M8[6,5]:=y[92,u]*y[55,u]*CZZ:M8[6,6]:=0:M8[6,7]:=0:
> M8[7,1]:=‘Fe’:M8[7,2]:=M8[2,2]*FFIII:M8[7,3]:=0:M8[7,4]:=M8[5,4]*FCF:
M8[7,5]:=M8[5,5]*FCF:M8[7,6]:=M8[3,6]*FFII:M8[7,7]:=0:
> M8[8,1]:=‘Zn’:M8[8,2]:=M8[4,2]*ZZII:M8[8,3]:=y[51,u]:M8[8,4]:=M8[6,4]*ZCZ:
M8[8,5]:=M8[6,5]*ZCZ:M8[8,6]:=M8[4,6]*ZZII:M8[8,7]:=0:
> for i from 9 to 15 do
> for j from 1 to 10 do
> M8[i,j]:=‘—’:od:od:
> M8[9,1]:=‘H2’:M8[9,7]:=y[56,u]:

```

```

> M8[10,1]:=‘Concentración’:M8[10,2]:=‘O4..kg/m^3’:M8[10,3]:=‘A9..kg/m^3’:
M8[10,4]:=‘A10..kg..m^3’:M8[10,5]:=‘O2..kg/m^3’:M8[10,7]:=‘HCl..Molaridad’:
M8[10,8]:=‘S.I.’:M8[10,9]:=‘Phi’:M8[10,10]:=‘A/O’:
> M8[11,1]:=‘Fe’:M8[11,2]:=y[80,u]:M8[11,3]:=y[69,u]:M8[11,4]:=y[53,u]:
M8[11,5]:=y[52,u]:
M8[11,7]:=2*(3+phi):M8[11,8]:=SI:M8[11,9]:=phi:M8[11,10]:=AOD:
> M8[12,1]:=‘Zn’:M8[12,2]:=y[90,u]:M8[12,3]:=y[94,u]:M8[12,4]:=y[92,u]:
M8[12,5]:=y[91,u]:
> M8[14,1]:=‘Flujo’:M8[14,2]:=‘O4..m^3/h’:M8[14,3]:=‘A9..m^3/h’:
M8[14,4]:=‘A10..m^3/h’:M8[14,5]:=‘O2..m^3/h’:
> M8[15,1]:=‘Volumétrico’:M8[15,2]:=y[81,u]:M8[15,3]:=y[68,u]:M8[15,4]:=y[55,u]:
M8[15,5]:=y[54,u]:
> M8[1,8]:=‘T. de Entrada’:
> M8[1,9]:=‘T. de Salida’:
> for t from 2 to 8 do
> M8[t,8]:=sum(‘M8[t,s]’,’s’=2..4);
> M8[t,9]:=sum(‘M8[t,s]’,’s’=5..7);
> od:
> for k from 1 to 8 do
> if k = 1 then
> M8[k,10]:=‘Error’:
> else
> if k < 7 then
> M8[k,10]:=‘—’:
> else
> M8[k,10]:=sum(‘M8[k,s]’,’s’=2..4)-sum(‘M8[k,s]’,’s’=5..7):
> end if:
> end if:
> od;
> M9:=matrix(11,7):M9[1,1]:=‘Especies’:M9[1,2]:=‘A10..kg/h’:M9[1,3]:=‘A12..kg/h’:
M9[1,4]:=‘A16..kg/h’:
> M9[2,1]:=‘FeCl2’:M9[2,2]:=y[53,u]*y[55,u]*CFE:M9[2,3]:=y[53,u]*y[57,u]*CFE:
M9[2,4]:=y[53,u]*y[58,u]*CFE:
> M9[3,1]:=‘ZnCl2’:M9[3,2]:=y[92,u]*y[55,u]*CZZ:M9[3,3]:=y[92,u]*y[57,u]*CZZ:
M9[3,4]:=y[92,u]*y[58,u]*CZZ:
> M9[4,1]:=‘Fe’:M9[4,2]:=M9[2,2]*FCF:M9[4,3]:=M9[2,3]*FCF:M9[4,4]:=M9[2,4]*FCF:
> M9[5,1]:=‘Zn’:M9[5,2]:=M9[3,2]*ZCZ:M9[5,3]:=M9[3,3]*ZCZ:M9[5,4]:=M9[3,4]*ZCZ:
> M9[6,1]:=‘Concentración’:M9[6,2]:=‘A10..kg/m^3’:M9[6,3]:=‘A12..kg/m^3’:
M9[6,4]:=‘A16..kg/m^3’:M9[6,5]:=‘—’:M9[6,6]:=‘S.I.’:M9[6,7]:=‘Phi’:
> for i from 7 to 11 do
> for j from 1 to 7 do
> M9[i,j]:=‘—’:od:od:
> M9[7,1]:=‘Fe’:M9[7,2]:=y[53,u]:M9[7,3]:=y[53,u]:M9[7,4]:=y[53,u]:M9[7,6]:=SI:

```

```

M9[7,7]:=phi:
> M9[8,1]:=‘Zn’:M9[8,2]:=y[92,u]:M9[8,3]:=y[92,u]:M9[8,4]:=y[92,u]:
> M9[10,1]:=‘Flujo’:M9[10,2]:=‘A10..m^3/h’:M9[10,3]:=‘A12..m^3/h’:
M9[10,4]:=‘A16..m^3/h’:M9[10,5]:=‘Factor.de.separación’:
> M9[11,1]:=‘Volumétrico’:M9[11,2]:=y[55,u]:M9[11,3]:=y[57,u]:M9[11,4]:=y[58,u]:
M9[11,5]:=fdc9:
> M9[1,5]:=‘T. de Entrada’:
> M9[1,6]:=‘T. de Salida’:
> for t from 2 to 5 do
> M9[t,5]:=sum(‘M9[t,s]’,’s’=2);
> M9[t,6]:=sum(‘M9[t,s]’,’s’=3..4);
> od:
> for k from 1 to 5 do
> if k = 1 then
> M9[k,7]:=‘Error’:
> else
> if k < 4 then
> M9[k,7]:=‘—’:
> else
> M9[k,7]:=sum(‘M9[k,s]’,’s’=2)-sum(‘M9[k,s]’,’s’=3..4):
> end if:
> end if:
> od:
> M10:=matrix(11,7):M10[1,1]:=‘Especies’:M10[1,2]:=‘A12..kg/h’:M10[1,3]:=‘A15..kg/h’:
M10[1,4]:=‘S1..kg/h’:
> M10[2,1]:=‘FeCl2’:M10[2,2]:=y[53,u]*y[57,u]*FCF:M10[2,3]:=F20*y[59,u]/(DA15*FCF):
M10[2,4]:=0:
> M10[3,1]:=‘FeCl2.4H2O’:M10[3,2]:=0:M10[3,3]:=0:M10[3,4]:=y[60,u]:
> M10[4,1]:=‘ZnCl2’:M10[4,2]:=y[92,u]*y[57,u]*CZZ:M10[4,3]:=y[93,u]*(y[59,u]/DA15)
*CZZ:M10[4,4]:=0:
> M10[5,1]:=‘Fe’:M10[5,2]:=M10[2,2]*FCF:M10[5,3]:=M10[2,3]*FCF:
M10[5,4]:=M10[3,4]*FCFT:
> M10[6,1]:=‘Zn’:M10[6,2]:=M10[4,2]*ZCZ:M10[6,3]:=M10[4,3]*ZCZ:M10[6,4]:=0:
> for i from 7 to 11 do
> for j from 1 to 7 do
> M10[i,j]:=‘—’:od:od:
> M10[7,1]:=‘Concentración’:M10[7,2]:=‘A12..kg/m^3’:M10[7,3]:=‘A15..kg/m^3’:
M10[7,5]:=‘S.I.’:M10[7,6]:=‘Phi’:
> M10[8,1]:=‘Fe’:M10[8,2]:=y[53,u]:M10[8,3]:=F20:M10[8,5]:=SI:M10[8,6]:=phi:
> M10[9,1]:=‘Zn’:M10[9,2]:=y[92,u]:M10[9,3]:=y[93,u]:
> M10[10,1]:=‘Flujo’:M10[10,2]:=‘A12..m^3/h’:M10[10,3]:=‘A15..m^3/h’:
M10[10,5]:=‘Densidad’:M10[10,6]:=‘A12..kg/m^3’:M10[10,7]:=‘A15..kg/m^3’:
> M10[11,1]:=‘Volumétrico’:M10[11,2]:=y[57,u]:M10[11,3]:=y[59,u]/DA15:

```

```

M10[11,5]:=‘Solucion’:M10[11,6]:=DA12:M10[11,7]:=DA15:
> M10[1,5]:=‘T. de Entrada’:
> M10[1,6]:=‘T. de Salida’:
> for t from 2 to 6 do
> M10[t,5]:=sum(‘M10[t,s]’,’s’=2);
> M10[t,6]:=sum(‘M10[t,s]’,’s’=3..4);
> od:
> for k from 1 to 6 do
> if k = 1 then
> M10[k,7]:=‘Error’:
> else
> if k < 5 then
> M10[k,7]:=‘—’:
> else
> M10[k,7]:=sum(‘M10[k,s]’,’s’=2)-sum(‘M10[k,s]’,’s’=3..4):
> end if:
> end if:
> od;
> M11:=matrix(16,9):M11[1,1]:=‘Especies’:M11[1,2]:=‘S1..kg/h’:M11[1,3]:=‘A18..kg/h’:
M11[1,4]:=‘Go..kg/h’:M11[1,5]:=‘S2..kg/h’:M11[1,6]:=‘G1..kg/h’:
> M11[2,1]:=‘FeCl2.4H2O’:M11[2,2]:=y[60,u]:M11[2,3]:=0:M11[2,4]:=0:M11[2,5]:=0:
M11[2,6]:=0:
> M11[3,1]:=‘Fe2O3’:M11[3,2]:=0:M11[3,3]:=0:M11[3,4]:=0:M11[3,5]:=y[64,u]:M11[3,6]:=0:
> M11[4,1]:=‘H2O’:M11[4,2]:=y[60,u]*HOCFT:M11[4,3]:=y[67,u]:M11[4,4]:=0:M11[4,5]:=0:
M11[4,6]:=y[66,u]*alfa*PMHO:
> M11[5,1]:=‘HCl’:M11[5,2]:=0:M11[5,3]:=0:M11[5,4]:=0:M11[5,5]:=0:
M11[5,6]:=y[66,u]*beta*PMHCl:
> M11[6,1]:=‘Fe’:M11[6,2]:=M11[2,2]*FCFT:M11[6,3]:=0:M11[6,4]:=0:M11[6,5]:=M11[3,5]
*FH:M11[6,6]:=0:
> M11[7,1]:=‘O’:M11[7,2]:=M11[4,2]*OHO:M11[7,3]:=M11[4,3]*OHO:M11[7,4]:=y[65,u]
*XOA*PMOG:M11[7,5]:=y[64,u]*OH:M11[7,6]:=y[66,u]*alfa*PMHO*OHO:
> M11[8,1]:=‘Cl’:M11[8,2]:=M11[2,2]*CCFT:M11[8,3]:=0:M11[8,4]:=0:M11[8,5]:=0:
M11[8,6]:=y[66,u]*beta*PMHCl*CHCl:
> M11[9,1]:=‘H’:M11[9,2]:=M11[2,2]*HCFT:M11[9,3]:=M11[4,3]*HHO:M11[9,4]:=0:
M11[9,5]:=0:M11[9,6]:=M11[4,6]*HHO+M11[5,6]*HHCl:
> for i from 10 to 16 do
> for j from 1 to 9 do
> M11[i,j]:=‘—’:od:od:
> M11[12,1]:=‘Flujo’:M11[12,2]:=‘Go..mol/h’:M11[12,3]:=‘G1..mol/h’:M11[12,5]:=‘Flujo’:
M11[12,6]:=‘A18..l/h’:M11[12,8]:=‘S.I.’:M11[12,9]:=‘Phi’:
> M11[13,1]:=‘Molar’:M11[13,2]:=y[65,u]:M11[13,3]:=y[66,u]:M11[13,5]:=‘Volumétrico’:
M11[13,6]:=M11[4,3]:
M11[13,8]:=SI:M11[13,9]:=phi:

```

```

> M11[15,1]:='G1':M11[15,2]:='H2O(g)':M11[15,3]:='HCl(g)':
> M11[16,1]:='%V':M11[16,2]:=alfa*100:M11[16,3]:=beta*100:
> M11[1,7]:='T. de Entrada':
> M11[1,8]:='T. de Salida':
> for t from 2 to 9 do
> M11[t,7]:=sum('M11[t,s]','s'=2..4);
> M11[t,8]:=sum('M11[t,s]','s'=5..6);
> od:
> for k from 1 to 9 do
> if k = 1 then
> M11[k,9]:='Error':
> else
> if k < 6 then
> M11[k,9]:='—':
> else
> M11[k,9]:=sum('M11[k,s]','s'=2..4)-sum('M11[k,s]','s'=5..6):
> end if:
> end if:
> od;
> M12:=matrix(10,7):M12[1,1]:='Especies':M12[1,2]:='A15..Kg/h':M12[1,3]:='A16..kg/h':
M12[1,4]:='A9..kg/h':
> M12[2,1]:='FeCl2':M12[2,2]:=(F20*y[59,u]/DA15)*CFF:M12[2,3]:=y[53,u]*y[58,u]*CFF:
M12[2,4]:=y[68,u]*y[69,u]*CFF:
> M12[3,1]:='ZnCl2':M12[3,2]:=y[93,u]*(y[59,u]/DA15)*CZZ:M12[3,3]:=y[92,u]*y[58,u]
*CZZ:M12[3,4]:=y[94,u]*y[68,u]*CZZ:
> M12[4,1]:='Fe':M12[4,2]:=M12[2,2]*FCF:M12[4,3]:=M12[2,3]*FCF:
M12[4,4]:=M12[2,4]*FCF:
> M12[5,1]:='Zn':M12[5,2]:=M12[3,2]*ZCZ:M12[5,3]:=M12[3,3]*ZCZ:
M12[5,4]:=M12[3,4]*ZCZ:
> for i from 6 to 10 do
> for j from 1 to 7 do
> M12[i,j]:='—':od:od:
> M12[6,1]:='Concentración':M12[6,2]:='A15..kg/m^3':M12[6,3]:='A16..kg/m^3':
M12[6,4]:='A9..kg/m^3':M12[6,6]:='S.I.':M12[6,7]:='Phi':
> M12[7,1]:='Fe':M12[7,2]:=F20:M12[7,3]:=y[53,u]:M12[7,4]:=y[69,u]:M12[7,6]:=SI:
M12[7,7]:=phi:
> M12[8,1]:='Zn':M12[8,2]:=y[93,u]:M12[8,3]:=y[92,u]:M12[8,4]:=y[94,u]:
> M12[9,1]:='Flujo':M12[9,2]:='A15..m^3/h':M12[9,3]:='A16..m^3/h':
M12[9,4]:='A9..m^3/h':
> M12[10,1]:='Volumétrico':M12[10,2]:=y[59,u]/DA15:M12[10,3]:=y[58,u]:
M12[10,4]:=y[68,u]:
> M12[1,5]:='T. de Entrada':
> M12[1,6]:='T. de Salida':

```

```

> for t from 2 to 5 do
> M12[t,5]:=sum('M12[t,s]', 's'=2..3);
> M12[t,6]:=sum('M12[t,s]', 's'=4);
> od:
> for k from 1 to 5 do
> if k = 1 then
> M12[k,7]:='Error':
> else
> if k < 4 then
> M12[k,7]:='—':
> else
> M12[k,7]:=sum('M12[k,s]', 's'=2..3)-sum('M12[k,s]', 's'=4):
> end if:
> end if:
> od;
> M13:=matrix(10,10):M13[1,1]:='Especies':M13[1,2]:='E-10..kg/h':M13[1,3]:='S-4..kg/h':
M13[1,4]:='S-9..kg/h':M13[1,5]:='S-12..kg/h':M13[1,6]:='S-15..kg/h':M13[1,7]:='S-31..kg/h':
> M13[2,1]:='ZnSO4':M13[2,2]:=y[19,u]*y[22,u]:M13[2,3]:=CSZEA*y[9,u]:M13[2,4]:=
CSZEA*y[21,u]:M13[2,5]:=CSZEA*y[36,u]:M13[2,6]:=CSZEA*y[45,u]:M13[2,7]:=0:
> M13[3,1]:='Zn':M13[3,2]:=M13[2,2]*ZSZ:M13[3,3]:=M13[2,3]*ZSZ:M13[3,4]:=M13[2,4]
*ZSZ:M13[3,5]:=M13[2,5]*ZSZ:M13[3,6]:=M13[2,6]*ZSZ:M13[3,7]:=y[70,u]:
> for i from 4 to 10 do
> for j from 1 to 10 do
> M13[i,j]:='—':od:od:
> M13[5,1]:='Concentración':M13[5,2]:='E-10..kg/m^3':M13[5,3]:='S-4..kg/m^3':
M13[5,4]:='S-9..kg/m^3':M13[5,5]:='S-12..kg/m^3':M13[5,6]:='S-15..kg/m^3':
> M13[6,1]:='ZnSO4':M13[6,2]:=y[19,u]:M13[6,3]:=CSZEA:M13[6,4]:=CSZEA:
M13[6,5]:=CSZEA:M13[6,6]:=CSZEA:
> M13[7,1]:='Zn':M13[7,2]:=y[19,u]*ZSZ:M13[7,3]:=CSZEA*ZSZ:
M13[7,4]:=CSZEA*ZSZ:M13[7,5]:=CSZEA*ZSZ:M13[7,6]:=CSZEA*ZSZ:
> M13[9,1]:='Flujo':M13[9,2]:='E-10..m^3/h':M13[9,3]:='S-4..m^3/h':
M13[9,4]:='S-9..m^3/h':M13[9,5]:='S-12..m^3/h':M13[9,6]:='S-15..m^3/h':
> M13[10,1]:='Volumétrico':M13[10,2]:=y[22,u]:M13[10,3]:=y[9,u]:
M13[10,4]:=y[21,u]:M13[10,5]:=y[36,u]:M13[10,6]:=y[45,u]:
> M13[1,8]:='T. de Entrada':
> M13[1,9]:='T. de Salida':
> for t from 2 to 3 do
> M13[t,8]:=sum('M13[t,s]', 's'=2);
> M13[t,9]:=sum('M13[t,s]', 's'=3..7);
> od:
> M13[10,8]:=sum('M13[10,s]', 's'=2):
> M13[10,9]:=sum('M13[10,s]', 's'=3..6):
> for k from 1 to 10 do

```

```

> if k = 1 then
> M13[k,10]:=‘Error’:
> else
> if k = 2 then
> M13[k,10]:=‘—’:
> else
> if k < 4 then
> M13[k,10]:=sum(‘M13[k,s]’,’s’=2)-sum(‘M13[k,s]’,’s’=3..7):
> else
> if k < 10 then
> M13[k,10]:=‘—’:
> else
> M13[k,10]:=sum(‘M13[k,s]’,’s’=2)-sum(‘M13[k,s]’,’s’=3..6):
> end if:
> end if:
> end if:
> end if:
> od;
> M14:=matrix(17,8):
> M14[1,1]:=‘Especies’:M14[1,2]:=‘A21..kg/h’:M14[1,3]:=‘O2-C2..kg/h’:
M14[1,4]:=‘A32..kg/h’:M14[1,5]:=‘O4-C2..kg/h’:
> M14[2,1]:=‘Fe2(SO4)3’:M14[2,2]:=y[46,u]*y[47,u]*SFF3:M14[2,3]:=0:
M14[2,4]:=y[72,u]*y[73,u]*SFF3:M14[2,5]:=0:
> M14[3,1]:=‘H2SO4’:M14[3,2]:=y[50,u]*y[47,u]:M14[3,3]:=0:
M14[3,4]:=y[75,u]*y[73,u]:M14[3,5]:=0:
> M14[4,1]:=‘ZnSO4’:M14[4,2]:=y[84,u]*y[47,u]*SZZ2:M14[4,3]:=0:
M14[4,4]:=y[86,u]*y[73,u]*SZZ2:M14[4,5]:=0:
> M14[5,1]:=‘Fe(HA)3A3’:M14[5,2]:=0:M14[5,3]:=0:M14[5,4]:=0:
M14[5,5]:=y[74,u]*y[82,u]*FIIIF:
> M14[6,1]:=‘Fe(HA)2A2’:M14[6,2]:=0:M14[6,3]:=(1/3)*y[52,u]*y[54,u]*FIIF:
M14[6,4]:=0:M14[6,5]:=0:
> M14[7,1]:=‘Zn(HA)2A2’:M14[7,2]:=0:M14[7,3]:=(1/3)*y[91,u]*y[54,u]*ZIIZ:
M14[7,4]:=0:M14[7,5]:=y[87,u]*y[82,u]*ZIIZ:
> M14[8,1]:=‘Fe’:M14[8,2]:=M14[2,2]*FSF:M14[8,3]:=M14[6,3]*FFII:
M14[8,4]:=M14[2,4]*FSF:M14[8,5]:=M14[5,5]*FFIII:
> M14[9,1]:=‘Zn’:M14[9,2]:=M14[4,2]*ZSZ:M14[9,3]:=M14[7,3]*ZZII:
M14[9,4]:=M14[4,4]*ZSZ:M14[9,5]:=M14[7,5]*ZZII:
> M14[10,1]:=‘SO4’:M14[10,2]:=M14[2,2]*SSF+M14[3,2]*SAS+M14[4,2]*SSZ:
M14[10,3]:=0:M14[10,4]:=M14[2,4]*SSF+M14[3,4]*SAS+M14[4,4]*SSZ:
M14[10,5]:=0:
> for i from 11 to 17 do
> for j from 1 to 8 do
> M14[i,j]:=‘—’:od:od:

```

```

>M14[12,1]:='Concentración':M14[12,2]:='A21..kg/m^3':M14[12,3]:='O2-C2..kg/m^3':
M14[12,4]:='A32..kg/m^3':M14[12,5]:='O4-C2..kg/m^3':M14[12,6]:='S.I.':
M14[12,7]:='Phi':M14[12,8]:='A/O':
> M14[13,1]:='Fe':M14[13,2]:=y[46,u]:M14[13,3]:=y[52,u]:M14[13,4]:=y[72,u]:
M14[13,5]:=y[74,u]:M14[13,6]:=SI:M14[13,7]:=phi:M14[13,8]:=AOC:
> M14[14,1]:='Zn':M14[14,2]:=y[84,u]:M14[14,3]:=y[91,u]:M14[14,4]:=y[86,u]:
M14[14,5]:=y[87,u]:
> M14[16,1]:='Flujo':M14[16,2]:='A21..m^3/h':M14[16,3]:='O2-C2..m^3/h':
M14[16,4]:='A32..m^3/h':M14[16,5]:='O4-C2..m^3/h':
> M14[17,1]:='Volumétrico':M14[17,2]:=y[47,u]:M14[17,3]:=(1/3)*y[54,u]:
M14[17,4]:=y[73,u]:M14[17,5]:=y[82,u]:
> M14[1,6]:='T. de Entrada':
> M14[1,7]:='T. de Salida':
> for t from 2 to 10 do
> M14[t,6]:=sum('M14[t,s]', 's'=2..3);
> M14[t,7]:=sum('M14[t,s]', 's'=4..5);
> od:
> for k from 1 to 10 do
> if k = 1 then
> M14[k,8]:='Error':
> else
> if k < 8 then
> M14[k,8]:='—':
> else
> M14[k,8]:=sum('M14[k,s]', 's'=2..3)-sum('M14[k,s]', 's'=4..5):
> end if:
> end if:
> od;
> M15:=matrix(17,8):
> M15[1,1]:='Especies':M15[1,2]:='A32..kg/h':M15[1,3]:='O2-C3..kg/h':
M15[1,4]:='A3..kg/h':M15[1,5]:='O4..C3..kg/h':
> M15[2,1]:='Fe2(SO4)3':M15[2,2]:=y[72,u]*y[73,u]*SFF3:M15[2,3]:=0:
M15[2,4]:=y[76,u]*y[78,u]*SFF3:M15[2,5]:=0:
> M15[3,1]:='H2SO4':M15[3,2]:=y[75,u]*y[73,u]:M15[3,3]:=0:
M15[3,4]:=y[79,u]*y[78,u]:M15[3,5]:=0:
> M15[4,1]:='ZnSO4':M15[4,2]:=y[86,u]*y[73,u]*SZZ2:M15[4,3]:=0:
M15[4,4]:=y[88,u]*y[78,u]*SZZ2:M15[4,5]:=0:
> M15[5,1]:='Fe(HA)3A3':M15[5,2]:=0:M15[5,3]:=0:M15[5,4]:=0:
M15[5,5]:=y[77,u]*y[83,u]*FIIF:
> M15[6,1]:='Fe(HA)2A2':M15[6,2]:=0:M15[6,3]:=(1/3)*y[52,u]*y[54,u]*FIIF:
M15[6,4]:=0:M15[6,5]:=0:
> M15[7,1]:='Zn(HA)2A2':M15[7,2]:=0:M15[7,3]:=(1/3)*y[91,u]*y[54,u]*ZIIF:
M15[7,4]:=0:M15[7,5]:=y[89,u]*y[83,u]*ZIIF:>

```

```

> M15[8,1]:=‘Fe’:M15[8,2]:=M15[2,2]*FSF:M15[8,3]:=M15[6,3]*FFII:
M15[8,4]:=M15[2,4]*FSF:M15[8,5]:=M15[5,5]*FFIII:
> M15[9,1]:=‘Zn’:M15[9,2]:=M15[4,2]*ZSZ:M15[9,3]:=M15[7,3]*ZZII:
M15[9,4]:=M15[4,4]*ZSZ:M15[9,5]:=M15[7,5]*ZZII:
> M15[10,1]:=‘SO4’:M15[10,2]:=M15[2,2]*SSF+M15[3,2]*SAS+M15[4,2]*SSZ:
M15[10,3]:=0:M15[10,4]:=M15[2,4]*SSF+M15[3,4]*SAS+M15[4,4]*SSZ:M15[10,5]:=0:
> for i from 11 to 17 do
> for j from 1 to 8 do
> M15[i,j]:=‘—’:od:od:
> M15[12,1]:=‘Concentración’:M15[12,2]:=‘A32..kg/m^3’:M15[12,3]:=‘O2-C3..kg/m^3’:
M15[12,4]:=‘A3..kg/m^3’:M15[12,5]:=‘O4..C3..kg/m^3’:M15[12,6]:=‘S.I.’:
M15[12,7]:=‘Phi’:M15[12,8]:=‘A/O’:
> M15[13,1]:=‘Fe’:M15[13,2]:=y[72,u]:M15[13,3]:=y[52,u]:M15[13,4]:=y[76,u]:
M15[13,5]:=y[77,u]:M15[13,6]:=SI:M15[13,7]:=phi:M15[13,8]:=AOC:
> M15[14,1]:=‘Zn’:M15[14,2]:=y[86,u]:M15[14,3]:=y[91,u]:M15[14,4]:=y[88,u]:
M15[14,5]:=y[89,u]:
> M15[16,1]:=‘Flujo’:M15[16,2]:=‘A32..m^3/h’:M15[16,3]:=‘O2-C3..m^3/h’:
M15[16,4]:=‘A3..m^3/h’:M15[16,5]:=‘O4..C3..m^3/h’:
> M15[17,1]:=‘Volumétrico’:M15[17,2]:=y[73,u]:M15[17,3]:=(1/3)*y[54,u]:
M15[17,4]:=y[78,u]:M15[17,5]:=y[83,u]:
> M15[1,6]:=‘T. de Entrada’:
> M15[1,7]:=‘T. de Salida’:
> for t from 2 to 10 do
> M15[t,6]:=sum(‘M15[t,s]’,s’=2..3);
> M15[t,7]:=sum(‘M15[t,s]’,s’=4..5);
> od:
> for k from 1 to 10 do
> if k = 1 then
> M15[k,8]:=‘Error’:
> else
> if k < 8 then
> M15[k,8]:=‘—’:
> else
> M15[k,8]:=sum(‘M15[k,s]’,s’=2..3)-sum(‘M15[k,s]’,s’=4..5):
> end if:
> end if:
> od;
> M16:=matrix(12,8):
> M16[1,1]:=‘Especies’:M16[1,2]:=‘O4-C1..kg/h’:M16[1,3]:=‘O4-C2..kg/h’:
M16[1,4]:=‘O4-C3..kg/h’:M16[1,5]:=‘O4..kg/h’:
> M16[2,1]:=‘Fe(HA)3A3’:M16[2,2]:=y[48,u]*y[49,u]*FIIIF:M16[2,3]:=y[74,u]*y[82,u]*FIIIF:
M16[2,4]:=y[77,u]*y[83,u]*FIIIF:M16[2,5]:=y[80,u]*y[81,u]*FIIIF:
> M16[3,1]:=‘Zn(HA)2A2’:M16[3,2]:=y[85,u]*y[49,u]*ZIIIZ:M16[3,3]:=y[87,u]*y[82,u]*ZIIIZ:

```

```

M16[3,4]:=y[89,u]*y[83,u]*ZIIZ:M16[3,5]:=y[90,u]*y[81,u]*ZIIZ:
> M16[4,1]:='Fe':M16[4,2]:=M16[2,2]*FFIII:M16[4,3]:=M16[2,3]*FFIII:
M16[4,4]:=M16[2,4]*FFIII:M16[4,5]:=M16[2,5]*FFIII:
> M16[5,1]:='Zn':M16[5,2]:=M16[3,2]*ZZII:M16[5,3]:=M16[3,3]*ZZII:
M16[5,4]:=M16[3,4]*ZZII:M16[5,5]:=M16[3,5]*ZZII:
> for i from 6 to 12 do
> for j from 1 to 8 do
> M16[i,j]:='---':od:od:
> M16[7,1]:='Concentración':M16[7,2]:='O4-C1..kg/m^3':M16[7,3]:='O4-C2..kg/m^3':
M16[7,4]:='O4-C3..kg/m^3':M16[7,5]:='O4..kg/m^3':M16[7,7]:='S.I.': M16[7,8]:='Phi':
> M16[8,1]:='Fe':M16[8,2]:=y[48,u]:M16[8,3]:=y[74,u]:M16[8,4]:=y[77,u]:M16[8,5]:=y[80,u]:
M16[8,7]:=SI:M16[8,8]:=phi:
> M16[9,1]:='Zn':M16[9,2]:=y[85,u]:M16[9,3]:=y[87,u]:M16[9,4]:=y[89,u]:M16[9,5]:=y[90,u]:
> M16[11,1]:='Flujo':M16[11,2]:='O4-C1..m^3/h':M16[11,3]:='O4-C2..m^3/h':
M16[11,4]:='O4-C3..m^3/h':M16[11,5]:='O4..m^3/h':
> M16[12,1]:='Volumétrico':M16[12,2]:=y[49,u]:M16[12,3]:=y[82,u]:M16[12,4]:=y[83,u]:
M16[12,5]:=y[81,u]:
> M16[1,6]:='T. de Entrada':
> M16[1,7]:='T. de Salida':
> for t from 2 to 5 do
> M16[t,6]:=sum('M16[t,s]', 's'=2..4);
> M16[t,7]:=sum('M16[t,s]', 's'=5);
> od:
> for k from 1 to 5 do
> if k = 1 then
> M16[k,8]:='Error':
> else
> if k < 4 then
> M16[k,8]:='---':
> else
> M16[k,8]:=sum('M16[k,s]', 's'=2..4)-sum('M16[k,s]', 's'=5):
> end if:
> end if:
> od;
> M17:=matrix(17,8):
> M17[1,1]:='Especies':M17[1,2]:='E-3..kg/h':M17[1,3]:='A3..kg/h':M17[1,4]:='S-29..kg/h':
M17[1,5]:='S-30..kg/h':
> M17[2,1]:='Fe2O3':M17[2,2]:=X*y[2,u]:M17[2,3]:=0:M17[2,4]:=y[23,u]*y[26,u]:
M17[2,5]:=0:
> M17[3,1]:='ZnO':M17[3,2]:=Y*y[2,u]:M17[3,3]:=0:M17[3,4]:=y[25,u]*y[26,u]:M17[3,5]:=0:
> M17[4,1]:='Fe(OH)3':M17[4,2]:=0:M17[4,3]:=0:M17[4,4]:=y[24,u]*y[26,u]:M17[4,5]:=0:
> M17[5,1]:='Fe2(SO4)3':M17[5,2]:=0:M17[5,3]:=y[76,u]*y[78,u]*SFF3:M17[5,4]:=0:
M17[5,5]:=0:

```

```

> M17[6,1]:='ZnSO4':M17[6,2]:=0:M17[6,3]:=y[88,u]*y[78,u]*SZZ2:M17[6,4]:=0:
M17[6,5]:=y[28,u]*y[29,u]:
> M17[7,1]:='H2SO4':M17[7,2]:=0:M17[7,3]:=y[79,u]*y[78,u]:M17[7,4]:=0:
M17[7,5]:=y[27,u]*y[29,u]:
> M17[8,1]:='Fe':M17[8,2]:=M17[2,2]*FH:M17[8,3]:=M17[5,3]*FSF:
M17[8,4]:=M17[2,4]*FH+M17[4,4]*FHF:M17[8,5]:=0:
> M17[9,1]:='Zn':M17[9,2]:=M17[3,2]*ZZ:M17[9,3]:=M17[6,3]*ZSZ:M17[9,4]:=M17[3,4]*ZZ:
M17[9,5]:=M17[6,5]*ZSZ:
> M17[10,1]:='SO4':M17[10,2]:=0:M17[10,3]:=M17[5,3]*SSF+M17[6,3]*SSZ+M17[7,3]*SAS:
M17[10,4]:=0:
M17[10,5]:=M17[6,5]*SSZ+M17[7,5]*SAS:
> for i from 11 to 17 do
> for j from 1 to 8 do
> M17[i,j]:='—':od:od:
> M17[12,1]:='Concentración':M17[12,2]:='A3..kg/m^3':M17[12,3]:='S-30..kg/m^3':
M17[12,5]:='Fracción.masa':M17[12,6]:='E-3..kg/kg':M17[12,7]:='S-29..kg/kg':
> M17[13,1]:='Fe':M17[13,2]:=y[76,u]:M17[13,3]:=0:M17[13,5]:='Fe2O3':M17[13,6]:=X:
M17[13,7]:=y[23,u]:
> M17[14,1]:='Zn':M17[14,2]:=y[34,u]*ZSZ:M17[14,3]:=y[28,u]*ZSZ:M17[14,5]:='ZnO':
M17[14,6]:=Y:M17[14,7]:=y[25,u]:
> M17[15,5]:='Fe(OH)3':M17[15,6]:=0:M17[15,7]:=y[24,u]:
> M17[16,1]:='Flujo':M17[16,2]:='A3..m^3/h':M17[16,3]:='S-30..m^3/h':M17[16,5]:='Flujo':
M17[16,6]:='E-3..kg/h':M17[16,7]:='S-29..kg/h':
> M17[17,1]:='Volumetrico':M17[17,2]:=y[78,u]:M17[17,3]:=y[29,u]:M17[17,5]:='Másico':
M17[17,6]:=y[2,u]:M17[17,7]:=y[26,u]:
> M17[1,6]:='T. de Entrada':
> M17[1,7]:='T. de Salida':
> for t from 2 to 10 do
> M17[t,6]:=sum('M17[t,s]', 's'=2..3);
> M17[t,7]:=sum('M17[t,s]', 's'=4..5);
> od:
> for k from 1 to 10 do
> if k = 1 then
> M17[k,8]:='Error':
> else
> if k < 8 then
> M17[k,8]:='—':
> else
> M17[k,8]:=sum('M17[k,s]', 's'=2..3)-sum('M17[k,s]', 's'=4..5):
> end if:
> end if:
> od;
> M18:=matrix(17,10):

```

```

> M18[1,1]:=‘Especies’:M18[1,2]:=‘E-11.kg/h’:M18[1,3]:=‘E-12..kg/h’:
M18[1,4]:=‘E-17..kg/h’:M18[1,5]:=‘E-16..kg/h’:M18[1,6]:=‘S-14..kg/h’:
M18[1,7]:=‘S-13..kg/h’:
> M18[2,1]:=‘Fe2O3’:M18[2,2]:=y[14,u]*y[17,u]:M18[2,3]:=0:
M18[2,4]:=y[40,u]*y[42,u]:M18[2,5]:=0:M18[2,6]:=y[30,u]*y[32,u]:M18[2,7]:=0:
> M18[3,1]:=‘ZnO’:M18[3,2]:=y[15,u]*y[17,u]:M18[3,3]:=0:
M18[3,4]:=y[41,u]*y[42,u]:M18[3,5]:=0:M18[3,6]:=y[31,u]*y[32,u]:M18[3,7]:=0:
> M18[4,1]:=‘Fe(OH)3’:M18[4,2]:=y[16,u]*y[17,u]:M18[4,3]:=0:M18[4,4]:=0:
M18[4,5]:=0:M18[4,6]:=0:M18[4,7]:=0:
> M18[5,1]:=‘Fe2(SO4)3’:M18[5,2]:=0:M18[5,3]:=0:M18[5,4]:=0:
M18[5,5]:=y[37,u]*y[39,u]:M18[5,6]:=0:M18[5,7]:=y[33,u]*y[35,u]:
> M18[6,1]:=‘ZnSO4’:M18[6,2]:=0:M18[6,3]:=CSZEA*y[36,u]:M18[6,4]:=0:
M18[6,5]:=y[38,u]*y[39,u]:M18[6,6]:=0:M18[6,7]:=y[34,u]*y[35,u]:
> M18[7,1]:=‘H2SO4’:M18[7,2]:=0:M18[7,3]:=CASEA*y[36,u]:M18[7,4]:=0:
M18[7,5]:=y[43,u]*y[39,u]:M18[7,6]:=0:M18[7,7]:=y[44,u]*y[35,u]:
> M18[8,1]:=‘Fe’:M18[8,2]:=M18[2,2]*FH+M18[4,2]*FHF:M18[8,3]:=0:
M18[8,4]:=M18[2,4]*FH:M18[8,5]:=M18[5,5]*FSF:M18[8,6]:=M18[2,6]*FH:
M18[8,7]:=M18[5,7]*FSF:
> M18[9,1]:=‘Zn’:M18[9,2]:=M18[3,2]*ZZ:M18[9,3]:=M18[6,3]*ZSZ:
M18[9,4]:=M18[3,4]*ZZ:M18[9,5]:=M18[6,5]*ZSZ:M18[9,6]:=M18[3,6]*ZZ:
M18[9,7]:=M18[6,7]*ZSZ:
> M18[10,1]:=‘SO4’:M18[10,2]:=0:M18[10,3]:=M18[6,3]*SSZ+M18[7,3]*SAS:
M18[10,4]:=0:M18[10,5]:=M18[5,5]*SSF+M18[6,5]*SSZ+M18[7,5]*SAS:
M18[10,6]:=0: M18[10,7]:=M18[5,7]*SSF+M18[6,7]*SSZ+M18[7,7]*SAS:
> for i from 11 to 17 do
> for j from 1 to 10 do
> M18[i,j]:=‘—’:od:od:
>M18[12,1]:=‘Concentración’:M18[12,2]:=‘E-12..kg/m^3’:M18[12,3]:=‘E-16..kg/m^3’:
M18[12,4]:=‘S-13..kg/m^3’:M18[12,6]:=‘Fracción.masa’:M18[12,7]:=‘E-11..kg/kg’:
M18[12,8]:=‘E-17..kg/kg’: M18[12,9]:=‘S-14..kg/kg’:
> M18[13,1]:=‘Fe’:M18[13,2]:=0:M18[13,3]:=y[37,u]*FSF:M18[13,4]:=y[33,u]*FSF:
M18[13,6]:=‘Fe2O3’:M18[13,7]:=y[14,u]:M18[13,8]:=y[40,u]:M18[13,9]:=y[30,u]:
> M18[14,1]:=‘Zn’:M18[14,2]:=CSZEA*ZSZ:M18[14,3]:=y[38,u]*ZSZ:
M18[14,4]:=y[34,u]*ZSZ:M18[14,6]:=‘ZnO’:M18[14,7]:=y[15,u]:M18[14,8]:=y[41,u]:
M18[14,9]:=y[31,u]:
> M18[15,1]:=‘H2SO4’:M18[15,2]:=CASEA:M18[15,3]:=y[43,u]:M18[15,4]:=y[44,u]:
M18[15,6]:=‘Fe(OH)3’:M18[15,7]:=y[16,u]:M18[15,8]:=0:M18[15,9]:=0:
>M18[16,1]:=‘Flujo’:M18[16,2]:=‘E-12..m^3/h’:M18[16,3]:=‘E-16..m^3/h’:
M18[16,4]:=‘S-13..m^3/h’:M18[16,6]:=‘Flujo’:M18[16,7]:=‘E-11..kg/h’:
M18[16,8]:=‘E-17..kg/h’:M18[16,9]:=‘S-14..kg/h’:
> M18[17,1]:=‘Volumétrico’:M18[17,2]:=y[36,u]:M18[17,3]:=y[39,u]:
M18[17,4]:=y[35,u]:M18[17,6]:=‘Másico’:M18[17,7]:=y[17,u]:M18[17,8]:=y[42,u]:
M18[17,9]:=y[32,u]:

```

```

> M18[1,8]:=‘T. de Entrada’:
> M18[1,9]:=‘T. de Salida’:
> for t from 2 to 10 do
> M18[t,8]:=sum(‘M18[t,s]’,’s’=2..5);
> M18[t,9]:=sum(‘M18[t,s]’,’s’=6..7);
> od:
> for k from 1 to 10 do
> if k = 1 then
> M18[k,10]:=‘Error’:
> else
> if k < 8 then
> M18[k,10]:=‘—’:
> else
> M18[k,10]:=sum(‘M18[k,s]’,’s’=2..5)-sum(‘M18[k,s]’,’s’=6..7):
> end if:
> end if:
> od;
> M19:=matrix(17,8):
> M19[1,1]:=‘Especies’:M19[1,2]:=‘E-14..kg/h’:M19[1,3]:=‘E-15..kg/h’:
M19[1,4]:=‘S-17..kg/h’:M19[1,5]:=‘S-16..kg/h’:
> M19[2,1]:=‘Fe2O3’:M19[2,2]:=y[30,u]*y[32,u]:M19[2,3]:=0:
M19[2,4]:=y[40,u]*y[42,u]:M19[2,5]:=0:
> M19[3,1]:=‘ZnO’:M19[3,2]:=y[31,u]*y[32,u]:M19[3,3]:=0:
M19[3,4]:=y[41,u]*y[42,u]:M19[3,5]:=0:
> M19[4,1]:=‘Fe2(SO4)3’:M19[4,2]:=0:M19[4,3]:=0:M19[4,4]:=0:
M19[4,5]:=y[37,u]*y[39,u]:
> M19[5,1]:=‘ZnSO4’:M19[5,2]:=0:M19[5,3]:=CSZEA*y[45,u]:M19[5,4]:=0:
M19[5,5]:=y[38,u]*y[39,u]:
> M19[6,1]:=‘H2SO4’:M19[6,2]:=0:M19[6,3]:=CASEA*y[45,u]:M19[6,4]:=0:
M19[6,5]:=y[43,u]*y[39,u]:
> M19[7,1]:=‘Fe’:M19[7,2]:=M19[2,2]*FH:M19[7,3]:=0:M19[7,4]:=M19[2,4]*FH:
M19[7,5]:=M19[4,5]*FSF:
> M19[8,1]:=‘Zn’:M19[8,2]:=M19[3,2]*ZZ:M19[8,3]:=M19[5,3]*ZSZ:
M19[8,4]:=M19[3,4]*ZZ:M19[8,5]:=M19[5,5]*ZSZ:
> M19[9,1]:=‘SO4’:M19[9,2]:=0:M19[9,3]:=M19[5,3]*SSZ+M19[6,3]*SAS:
M19[9,4]:=0:M19[9,5]:=M19[4,5]*SSF+M19[5,5]*SSZ+M19[6,5]*SAS:
> for i from 10 to 17 do
> for j from 1 to 8 do
> M19[i,j]:=‘—’:od:od:
> M19[11,1]:=‘Concentración’:M19[11,2]:=‘E-15..kg/m^3’:M19[11,3]:=‘S-16..kg/m^3’:
M19[11,5]:=‘Fracción.masa’:M19[11,6]:=‘E-14.kg/kg’:M19[11,7]:=‘S-17..kg/kg’:
> M19[12,1]:=‘Fe’:M19[12,2]:=0:M19[12,3]:=y[37,u]*FSF:M19[12,5]:=‘Fe2O3’:
M19[12,6]:=y[30,u]:M19[12,7]:=y[40,u]:

```

```

> M19[13,1]:='Zn':M19[13,2]:=CSZEA*ZSZ:M19[13,3]:=y[38,u]*ZSZ:
M19[13,5]:='ZnO':M19[13,6]:=y[31,u]:M19[13,7]:=y[41,u]:
> M19[14,1]:='H2SO4':M19[14,2]:=CASEA:M19[14,3]:=y[43,u]:
> M19[16,1]:='Flujo':M19[16,2]:='E-15..m^3/h':M19[16,3]:='S-16..m^3/h':
M19[16,5]:='Flujo':M19[16,6]:='E-14.kg/h':M19[16,7]:='S-17..kg/h':
> M19[17,1]:='Volumétrico':M19[17,2]:=y[45,u]:M19[17,3]:=y[39,u]:
M19[17,5]:='Másico':M19[17,6]:=y[32,u]:M19[17,7]:=y[42,u]:
> M19[1,6]:='T. de Entrada':
> M19[1,7]:='T. de Salida':
> for t from 2 to 9 do
> M19[t,6]:=sum('M19[t,s]','s'=2..3);
> M19[t,7]:=sum('M19[t,s]','s'=4..5);
> od:
> for k from 1 to 9 do
> if k = 1 then
> M19[k,8]:='Error':
> else
> if k < 7 then
> M19[k,8]:='—':
> else
> M19[k,8]:=sum('M19[k,s]','s'=2..3)-sum('M19[k,s]','s'=4..5):
> end if:
> end if:
> od;
> M20:=matrix(10,9):
>M20[1,1]:='—':M20[1,2]:='kg.Fe2O3/h':M20[1,3]:='kg.ZnO/h':
M20[1,4]:='kg.H2O/h':M20[1,5]:='kg.Fe/h':M20[1,6]:='kg.Zn/h':M20[1,7]:='kg.O2/h':
M20[1,8]:='kg.N2/h':M20[1,9]:='kg.H2/h':
> for i from 2 to 10 do
> for j from 1 to 9 do
> M20[i,j]:=0:M20[2,j]:='—':M20[7,j]:='—':od:od:
> M20[2,1]:='ENTRADA':M20[7,1]:='SALIDA':
> M20[3,1]:='Calcina':M20[3,2]:=X*F:M20[3,3]:=Y*F:
> M20[4,1]:='Reductor':M20[4,6]:=y[51,u]:
> M20[5,1]:='Aire':M20[5,7]:=y[65,u]*XOA*PMOG:M20[5,8]:=y[65,u]*XNA*PMNG:
> M20[6,1]:='Agua':M20[6,4]:=y[67,u]:
> M20[8,1]:='Zinc':M20[8,6]:=y[70,u]:
> M20[9,1]:='Hidrógeno':M20[9,9]:=y[56,u]:
> M20[10,1]:='hematita':M20[10,2]:=y[64,u]:
> M21:=matrix(2,4):M21[1,1]:='Indice.estequiometrico':M21[1,2]:='PHI':M21[2,1]:=SI:
M21[2,2]:=phi:M21[1,3]:='A/O.Cargado':M21[1,4]:='A/O.Despojo':M21[2,3]:=AOC:
M21[2,4]:=AOD:

```