



ABER DE MIS HIJOS
RÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y METALURGIA

***CORRELACION MATEMATICA DE LOS CAMBIOS DE
TAMAÑO DE PARTICULA DE MATAS SOLIDAS DE COBRE
OXIDADAS A ALTAS TEMPERATURAS***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

ESPECIALIDAD EN ING. DE PROCESOS

PRESENTA:

JOSE ALFONSO TIRADO OCHOA

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Contenido

	Página
Resumen	I
Indice de figuras	II
Indice de tablas	IV
1. Introducción	1
2. Objetivos	6
3. Revisión bibliográfica	7
3.1 Descripción de la fase dispersa en un sistema de partículas	7
3.2 Fenómenos de fragmentación de partículas sulfurosas	13
3.3 Correlación de datos de fragmentación de partículas sulfurosas	18
4. Metodología	24
5. Discusión de resultados	27
5.1 Correlación de datos de alimentación al horno de conversión	27
5.2 Correlación de productos oxidados	30
5.3 Predicción de la generación de polvos durante la oxidación	35
5.4 Observaciones finales	38
6. Conclusiones	39
7. Referencias	41
8. Apéndice: Funciones de densidad experimentales con mata de 72% reportados por Riihilahti et al. (1997) y Pérez-Tello (1999).	43

RESUMEN

La fragmentación de partículas sulfurosas es un fenómeno relevante que ocurre en la cámara de reacción de los procesos de fusión instantánea de concentrados de cobre y de conversión instantánea de matas sólidas de cobre. La fragmentación de partículas se encuentra asociada a la generación de polvos, los cuales son causa de serios problemas de operación en estos procesos. En este trabajo se describe una correlación matemática para estimar los cambios de tamaño que sufren las partículas de matas sólidas de cobre durante su oxidación en un horno de conversión instantáneo a nivel laboratorio. La correlación se expresa en términos de las funciones de densidad de la alimentación y de los productos de oxidación y consta de seis parámetros ajustables. Los parámetros de la correlación son calculados a partir de las condiciones de operación del horno. La correlación desarrollada mostró un ajuste superior al 90% de los datos experimentales, incluyendo la predicción de la cantidad de polvos generados durante la oxidación de las partículas. Se discute la posible aplicación de la correlación a un horno de conversión instantáneo a nivel industrial.

1. Introducción

El presente trabajo se relaciona con la producción de cobre metálico a partir de minerales sulfurados mediante procesos pirometalúrgicos, los cuales involucran las siguientes etapas:

- a) Procesamiento del mineral para obtención de concentrado.
- b) Fundición del concentrado para producción de mata.
- c) Conversión de la mata para producción de cobre blister.
- d) Refinación del cobre blister y moldeo de ánodos.
- e) Refinación electrolítica de ánodos a cátodos de cobre.

Este proyecto se enfoca en la tercera etapa de esta secuencia; es decir, la conversión de mata de cobre a cobre blister. En esta etapa, el proceso convencional utiliza hornos convertidores tipo Peirce – Smith. Estos hornos son de geometría cilíndrica y operan intermitentemente. Los convertidores Peirce - Smith han sido ampliamente utilizados en la industria durante los últimos años; sin embargo, en la actualidad la tendencia general es sustituirlos por nuevas tecnologías debido a que presentan los siguientes problemas:

- 1) Alta emisión de contaminantes gaseosos (SO_2) y partículas a la atmósfera.
- 2) El manejo de las fases fundidas de mata y cobre blister es riesgosa y difícil, a la vez que permite la emisión de gases de SO_2 durante las operaciones de vaciado.

- 3) Baja eficiencia energética debido a las fugas durante el vaciado y pasos de conversión.
- 4) Es un proceso por lotes.

Una alternativa al convertidor Peirce - Smith es el reactor de conversión instantáneo, el cual se muestra en la Figura 1. Una característica importante de este proceso es el manejo de la mata de cobre en estado sólido. La mata fundida en el horno de fusión instantáneo se solidifica y tritura antes de alimentarse al convertidor instantáneo, donde se oxida con una corriente de aire enriquecido con oxígeno para producir las fases fundidas de cobre blister y escoria.

Las principales ventajas del proceso de conversión instantáneo sobre la conversión en hornos Peirce - Smith son (Asteljoki et al., 1985; Anjala et al., 1987):

- 1) Las emisiones de SO_2 pueden reducirse al 4% de las emisiones de un convertidor Peirce - Smith. El polvo se recircula completamente al convertidor, por lo que las emisiones de polvos se reducen considerablemente.
- 2) Se elimina el manejo de mata fundida, el transporte de mata sólida es fácil, seguro y menos contaminante.
- 3) Los pasos de fundición y conversión se llevan a cabo separadamente, lo cual permite una mayor flexibilidad de operación.

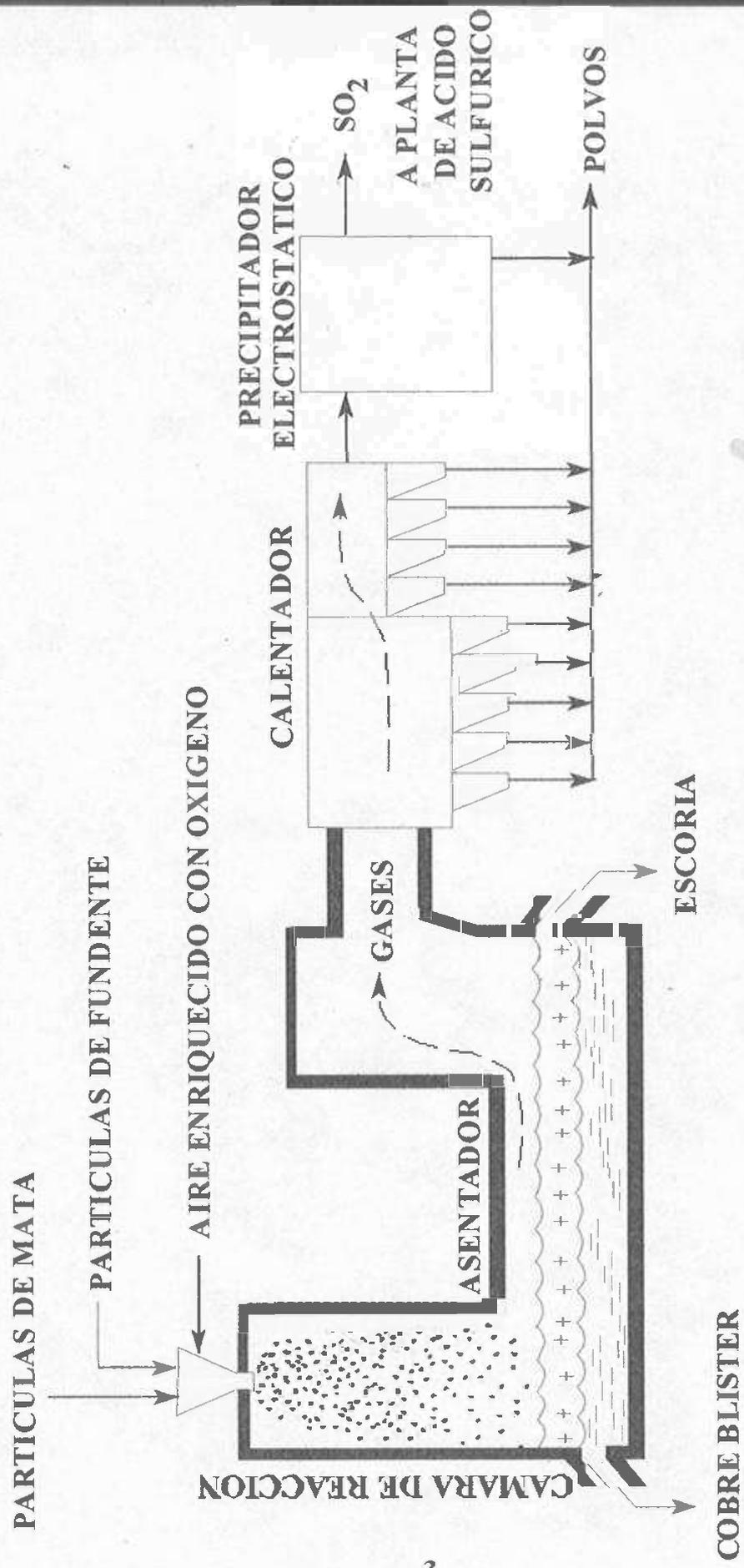


Figura 1. Proceso de Conversión Instantánea de Matas Sólidas de Cobre.
Adaptado de George et al. (1995)

- 4) Es un proceso continuo que genera una corriente de SO_2 de concentración constante, lo cual elimina la necesidad de sobrediseñar la planta de ácido sulfúrico y facilita su óptimo funcionamiento.

La primera planta industrial de este proceso fue puesta en operación en 1995 con resultados satisfactorios (George et al., 1995). Actualmente, existe el interés por entender los mecanismos que controlan el proceso de conversión instantánea con el fin de lograr su futura optimización. Esto ha conducido a investigaciones experimentales (Asteljoki y Kytö, 1986; Suominen et al., 1991; Riihilahti et al., 1997; Swartling, 1996) y al desarrollo de modelos matemáticos que intentan describir los fenómenos que ocurren dentro del sistema de reacción Shook et al., 1995; Jiao et al., 1995; Sohn et al., 1996; Pérez-Tello, et al. (2001b). Los cambios de tamaño experimentados por las partículas durante la conversión instantánea están directamente relacionados con la generación de polvos dentro del horno (Shook et al., 1995). Los polvos se producen por la fragmentación de las partículas oxidadas a altas temperaturas, y su presencia es indeseable ya que provocan bloqueos y taponamientos de las líneas, disminución de la eficiencia de los equipos de intercambio térmico, así como la necesidad de incluir equipo adicional para su manejo, eliminación y reciclado (Sohn y Ramachandran, 1998).

Por lo tanto, el esclarecimiento de los mecanismos que controlan la generación de polvos y los cambios de tamaño en general de las partículas es importante desde el punto de vista operativo.

El presente estudio continúa el trabajo experimental desarrollado en la Universidad de Utah por Riihilahti et al. (1997) y Swartling (1996) con el fin de obtener una correlación matemática sencilla de los cambios de tamaño observados en las partículas durante el estudio experimental reportado por los autores. Se busca que dicha correlación matemática sea utilizada para generar criterios de operación del horno industrial, así como para mejorar las predicciones del modelo matemático del horno de conversión instantáneo reportado por Pérez-Tello (1999).

2 Objetivos

El objetivo general de este proyecto es el desarrollo de una correlación matemática para describir los cambios de tamaño de partícula de matas sólidas de cobre oxidadas a alta temperatura en un horno de conversión instantánea a nivel laboratorio.

Los objetivos particulares de este proyecto incluyen los siguientes:

a) El desarrollo y ajuste de funciones matemáticas para las distribuciones de tamaño de partícula de las corrientes de alimentación y de los productos de oxidación de un horno de conversión instantáneo a nivel laboratorio a diferentes condiciones de operación.

b) El análisis de los efectos de las variables de operación sobre los parámetros de ajuste de la correlación matemática y su interpretación física.

c) La generación de criterios de operación de un horno de conversión instantáneo a nivel industrial en relación a la posible generación de polvos.

3. Revisión Bibliográfica

3.1 Descripción de la Fase Dispersa en un Sistema de Partículas

El tratamiento de sistemas de poblaciones de partículas esta documentado en la literatura de procesamiento de minerales y materiales (Kelly y Spottiswood, 1982; Foust et al., 1978). Los datos de poblaciones se reportan en forma de graficas de diferentes tipos, siendo las mas comunes la función de densidad y la función de distribución o acumulativa.

En muchos procesos metalúrgicos se debe trabajar con partículas en una solución ó partículas en una fase gaseosa; por ejemplo, cristales en una solución sobresaturada ó partículas sólidas en una corriente de aire como en un lecho fluidizado. Las partículas se reconocen como la fase dispersa y el fluido como la fase continua. La calidad o el estado de la fase dispersa se especifica en términos de uno ó más características importantes, tales como el tamaño de partícula, composición y área superficial. La fase continua se describe por su temperatura, presión, concentración, densidad, viscosidad y velocidad.

Algunas propiedades de las partículas utilizadas para describir sus características son: tamaño, forma, composición, densidad, porosidad, carga de superficie, dureza y conductividad eléctrica, entre otras.

Existen disponibles una variedad de instrumentos para medir cada una de las propiedades mencionadas. Por ejemplo, el tamaño de las partículas puede ser medido por un microscopio, por métodos de sedimentación, sistema de cribado; ó con equipos especializados como un contador Coulter y Sedígrafo. Para figuras geométricas como esferas y cubos, el tamaño puede definirse con precisión, pero para partículas con figuras irregulares, la definición es muy vaga. En estos casos, la medición del tamaño depende del método empleado. La medición del tamaño realizada con un instrumento puede no ser el mismo que el realizado con otro instrumento.

Cuando se trata con partículas, se encuentran millones de ellas en una muestra. La medición apropiada de sus propiedades no es sólo un valor, sino una serie de valores, es decir, una distribución del valor de la propiedad en la población.

La caracterización más sencilla de una población se logra cuando sólo una propiedad de las partículas es registrada en la población entera por ejemplo, la propiedad "z", la cual puede ser tamaño de partícula. Se define a "z" de modo que tome valores entre ζ_{\min} Y ζ_{\max} en la población, y se divide el intervalo completo en un número de intervalos, como se muestra en la Figura 2.

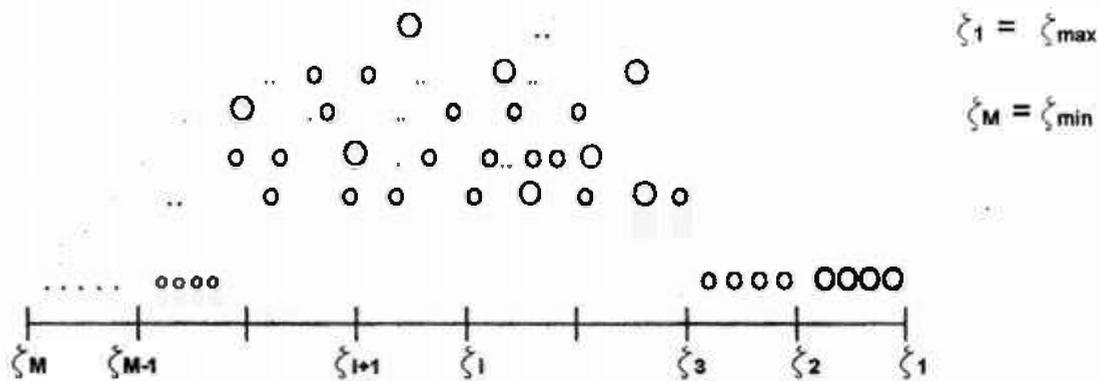


Figura 2. Distribución gráfica de distintas fracciones de tamaños de partículas dentro de sus intervalos muestrales.

Cada partícula de la muestra se ubica en el intervalo al que pertenece. Enseguida se deciden las unidades para cuantificar la cantidad de partículas en cada intervalo de la población (ΔQ_i). Esta cantidad puede ser: número de partículas en el intervalo, área superficial de las partículas en el intervalo, volumen ó masa de las partículas en el intervalo, etc. Frecuentemente, la cantidad de la población es masa ó número de individuos y la propiedad es el tamaño.

Sea ΔQ_1 la cantidad de partículas en el intervalo ζ_1 a ζ_2 , ΔQ_2 la cantidad de partículas en el intervalo ζ_2 a ζ_3 , y así sucesivamente hasta ΔQ_{M-1} en el intervalo ζ_{M-1} a ζ_M . Entonces, la cantidad total de las partículas está dado por:

$$Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \dots + \Delta Q_i + \dots + \Delta Q_{M-1} \tag{1}$$

Está claro que $\Delta Q_i / Q$ es la fracción de la cantidad total de las partículas, las cuales residen en el intervalo propio "i" ejemplo desde ζ_i hasta ζ_{i+1} . Ahora es posible construir un histograma de frecuencia relativo como sigue:

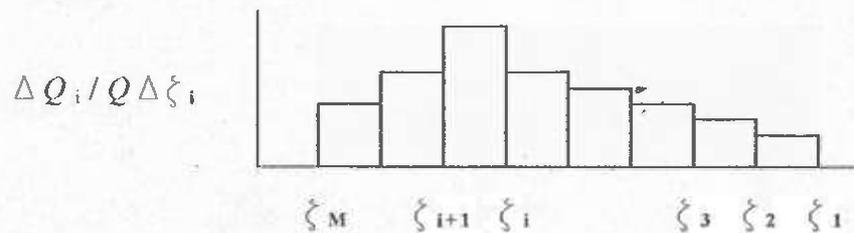


Figura 3. Histograma de frecuencia relativa.

La cantidad $\Delta \zeta_i$ se refiere a $\zeta_i - \zeta_{i+1}$. Nótese que para el intervalo ζ_{i+1} a ζ_i , la altura de la frecuencia relativa multiplicada por la longitud del intervalo es igual a la fracción del valor total que reside en ese intervalo:

$$(\Delta Q_i / Q \Delta \zeta_i) (\zeta_i - \zeta_{i+1}) = \Delta Q_i / Q \quad (2)$$

Puede graficarse el valor de Q_i / Q a ζ_i esto es, la gráfica de la frecuencia acumulativa. La cantidad Q_i / Q corresponde a la fracción acumulativa de la población la cual tiene un valor menor que ζ_i .

Q_i se define como:

$$Q_i = \Delta Q_{M-1} + \Delta Q_{M-2} + \dots + \Delta Q_{i-1} + \Delta Q_i, \quad (3)$$

Por ejemplo, la suma de los valores en cada intervalo anterior e incluyendo el i -ésimo intervalo proporciona la frecuencia acumulativa cuya gráfica es como sigue:

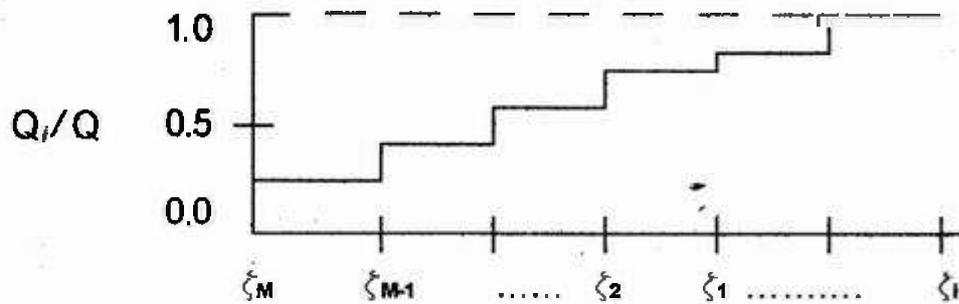


Figura 4. Gráfica de frecuencia acumulada

La gráfica de frecuencia relativa proporciona la fracción en cada intervalo y la gráfica de frecuencia acumulativa proporciona la fracción de la población debajo de un valor dado de ζ_i . Aun, sin embargo, no se puede extraer información de estas gráficas para valores entre las fronteras de los intervalos. Si se quisiera obtener la fracción correspondiente a ζ_π a $\zeta_{\pi+1}$ donde ζ_π y $\zeta_{\pi+1}$ no coinciden con $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_M$, ó si se desea obtener la fracción de la población que tiene la propiedad de ser menor que ζ_π . Esto solamente sería posible si podemos hacer mas y más subdivisiones de intervalos al punto de tener un número infinito de intervalos. Entonces la función con forma de escalera mostrada anteriormente llegará a ser continua:

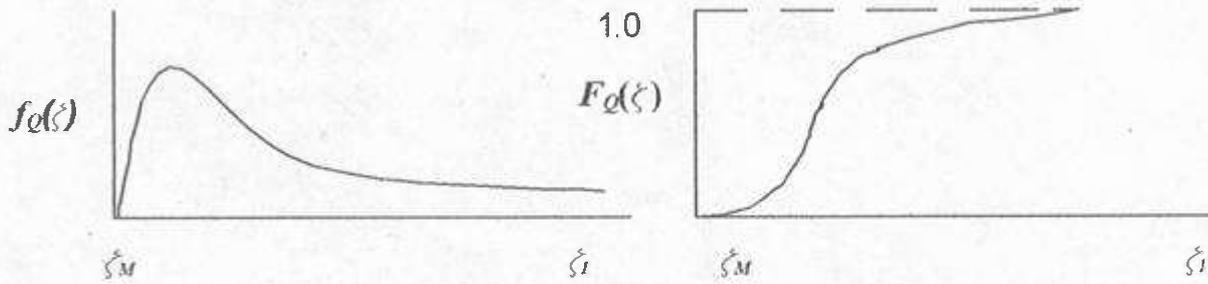


Figura 5. Funciones continuas de densidad (Izquierda) y Función de distribución (derecha).

Las funciones de densidad y de distribución se describen en detalle en textos de probabilidad y estadística. Las siguientes identidades se cumplen para ambas funciones:

$$F_0(\zeta) = \int_{\zeta_{\min}}^{\zeta} f_0(\zeta) d\zeta \quad (4)$$

$$\int_{\zeta_{\min}}^{\zeta_{\max}} f_0(\zeta) d\zeta = 1 \quad (5)$$

$$f_0(\zeta) = dF_0(\zeta) / d\zeta \quad (6)$$

La función $F_0(\zeta)$ es una función que se incrementa monotónicamente entre los valores de cero y la unidad; la función $f_0(\zeta)$ puede adquirir cualquier valor igual o mayor a cero en cualquier punto, y puede presentar máximos y mínimos múltiples.

Nótese que $F_0(\zeta)$ tiene un significado físico preciso que es la fracción acumulada de la muestra más pequeña que el tamaño " ζ ". Por otro lado, la función $f_0(\zeta)$ por sí sola no tiene significado físico a excepción de que es

el valor de la función. Sin embargo, el producto $f(\xi)d\xi$ significa la fracción de partículas de la población contenida en el intervalo $\xi + d\xi$, donde $d\xi$ es infinitamente pequeño.

Varias formas funcionales han sido sugeridas para el ajuste de las funciones de densidad, $f(\xi)$, todas ellas intentan reproducir el comportamiento de poblaciones de partículas de casos reales. Algunas de las funciones reportadas en la literatura son: función de densidad uniforme, función de densidad normal, función de distribución normal logarítmica, función de densidad exponencial y la función de densidad Gamma, entre otras (Rajamani, 1994).

3.2 Fenómenos de Fragmentación de Partículas Sulfurosas

Un aspecto relevante en la discusión de los datos experimentales es la fragmentación de las partículas de mata de cobre, lo cual se ha visto que es el principal factor responsable de la generación de polvos durante la oxidación. Los mecanismos que se describen a continuación proponen una interpretación de la mayoría de los cambios físicos observados en las partículas durante los experimentos, y adopta muchas de las ideas de otros investigadores en el campo.

El material de este apartado está basado en el estudio reportado por Pérez-Tello et al. (2001a). El modelo que se discute se basa en el patrón originalmente propuesto por Kim y Themelis (1986), y posteriormente modificado por Jokilaakso et al. (1991).

La fragmentación de las partículas sulfurosas es un fenómeno complejo en el cual participan diferentes procesos. Parece ser que no solamente se sigue un único mecanismo en el cual las partículas sulfurosas en general, y particularmente partículas de mata de cobre, se fragmentan cuando reaccionan en una atmósfera oxidante.

La diferencia en la composición de las partículas y condiciones de reacción afectan fuertemente el patrón seguido por partículas individuales durante su fragmentación.

El modelo físico de la fragmentación de partículas de mata de cobre se muestra esquemáticamente en la Figura 6. La oxidación comienza en la superficie de la partícula. Debido a su alta reactividad, el sulfuro de hierro se oxida primero. La disociación del azufre libre también puede ocurrir, lo cual forma poros en el núcleo antes de oxidarse la superficie. Después de la ignición, el sulfuro sin reaccionar se funde en el núcleo, al mismo tiempo que la superficie de la partícula se transforma en una mezcla viscosa o porosa de óxidos y sulfuros. Debido a la oxidación del azufre, se forma dióxido de azufre en el interior de la partícula, creando pequeñas burbujas que empiezan a crecer al mismo tiempo que la reacción sucede. El incremento en la presión del gas contenido en el interior, provoca que las partículas se inflen convirtiéndose en esferas grandes. La fragmentación de partículas de mata de cobre posiblemente se realiza en material fundido del núcleo, el cual es empujado hacia afuera de la partícula a través de los poros de la capa superficial oxidada. El material fundido forma pequeñas esferas que se separan de la superficie de la partícula grande.

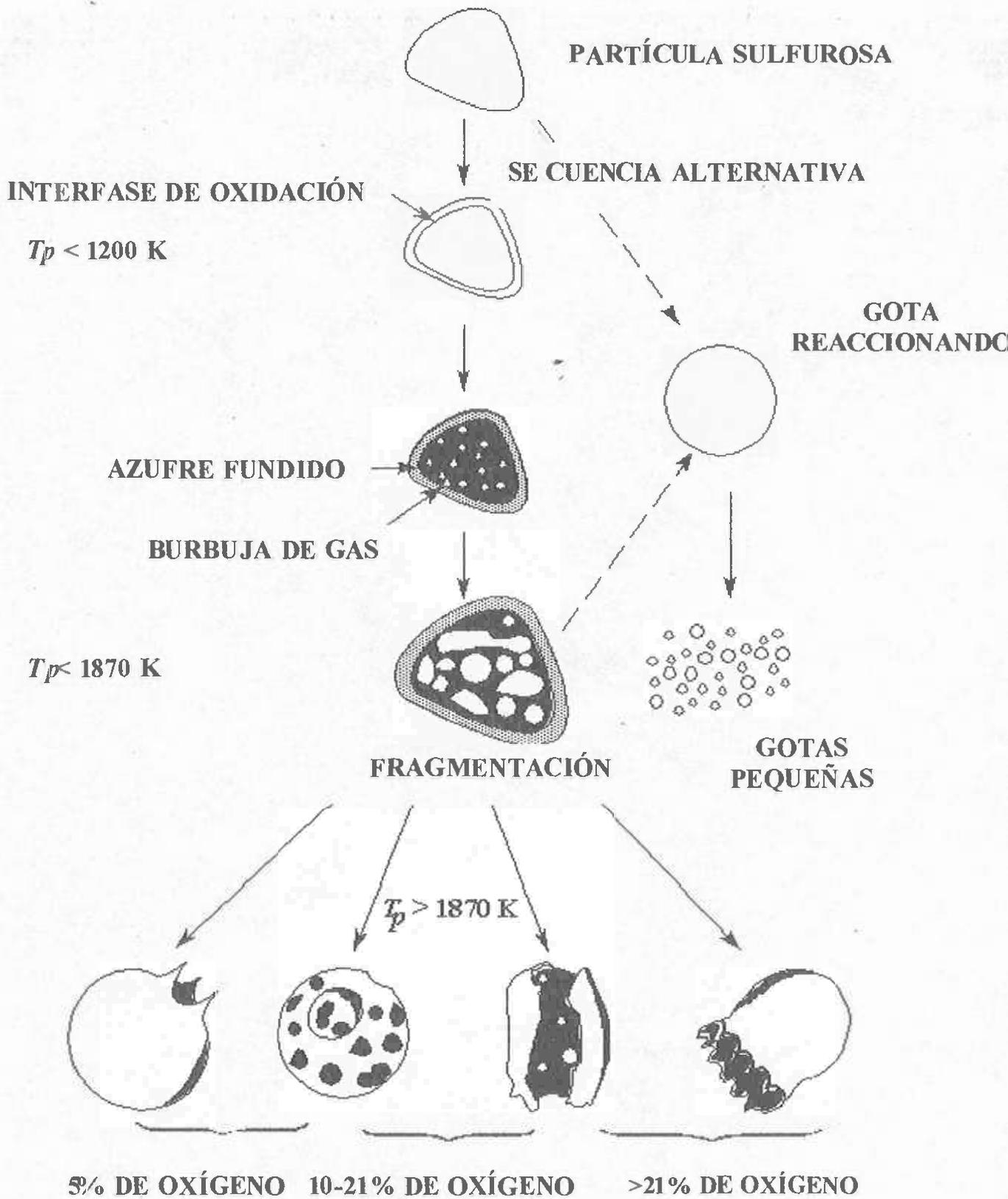


Figura 6. Esquema del modelo físico de la fragmentación de partículas de matas de cobre oxidadas a altas temperaturas. Adaptado de Jokilaakso (1993).

El desplazamiento de los sulfuros fundidos dentro de la partícula expande las burbujas de gas dentro del núcleo, reduciendo la presión de vapor interna. Con esto la presión de vapor disminuye y una fragmentación completa de la partícula puede evitarse.

El material fundido, empujado hacia fuera a través de los poros, puede causar que los poros se tapen. Esto incrementa la presión interna de la partícula. Cuando la presión del gas en el interior del núcleo fundido excede los efectos de la tensión superficial de la superficie sólida de la partícula, entonces la partícula se fragmenta. La evolución del gas puede resultar en la expulsión de material fundido, finamente dividido a través de la ruptura, dejando una cubierta hueca.

La evolución del gas puede también separar la capa de óxidos del núcleo, creando fragmentos de ella. En algunos casos la presión del gas en el interior puede ocasionar que la capa de óxidos explote en pedazos y el núcleo fundido sea descargado en pequeñas gotas. Si las paredes de las partículas se expanden lo suficiente debido al incremento de presión, esta se vuelve más delgada. Esto facilita que la presión sea liberada por pequeños orificios en la superficie de la partícula. Este mecanismo produce cenosferas y pequeños fragmentos, o solamente partículas con orificios. La resistencia de la capa sólida de óxidos a fragmentarse parece estar relacionada con su contenido de hierro. Una capa compuesta de sulfuros y óxido de cobre tienen un menor punto de fusión que una compuesta por óxidos de hierro puro y por lo tanto una menor resistencia a la fragmentación. Los óxidos de hierro actúan como un pegamento viscoso, manteniendo la partícula unida y previniendo su fragmentación. Esto explica por qué la mata de 72% literalmente

explota, mientras que la mata del 58% es más resistente a la fragmentación. Esto fue observado en un estudio previo (Riihilahti, 1997).

Cuando las partículas de mata de 58% se fragmentan, parecen expulsar material fundido después de la expansión inicial durante la oxidación. Las gotas también pueden producirse por la perforación de grandes partículas fundidas o parcialmente fundidas. La tensión superficial del material fundido puede causar que en la superficie del material se formen pequeñas gotas esféricas que dejen las partículas principales, resultando en la desintegración de la partícula.

La fragmentación de partículas puede también producirse si la velocidad de calentamiento de la partícula es alta, o suficiente para fundir completamente la partícula, antes de que se forme cualquier corteza sólida en su superficie (ruta alternativa descrita en la Figura 6).

Después de la expansión inicial debido a la evolución del gas, las partículas explotan en lugar de expulsar material fundido a través de la superficie. Esto es causado posiblemente por un incremento en la presión interna de la gota, la cual excede las fuerzas de cohesión en la gota.

La fragmentación de las partículas de mata de cobre es más severa para partículas grandes que para pequeñas. Esto se explica en términos de la cantidad de azufre inicial en las partículas, lo que eventualmente provoca que el dióxido de azufre se incremente. Las cantidades de gas y calor generado en el interior de las partículas grandes como resultado de la oxidación del azufre son mayores que las producidas en partículas pequeñas.

3.3 Correlación de Datos Experimentales de Fragmentación de Partículas

Swartling (1996) reportó el tratamiento de los datos experimentales de la oxidación de partículas de mata de cobre obtenidos en el convertidor a nivel laboratorio de la Universidad de Utah, el cual se muestra en la Figura 7. El autor incluyó el efecto de las variables de proceso en la distribución de tamaño de partículas, sobre la función de distribución ó función acumulativa, obteniendo el siguiente modelo empírico:

$$F_3(x) = A + B \ln(x) \quad (7)$$

donde:

$F_3(x)$ = Fracción acumulada del numero total de partículas que tienen un tamaño menor al tamaño x correspondiente.

A = Parámetro de ajuste.

B = Parámetro de ajuste.

x = Tamaño medio de partícula, en μm .

Se encontraron las siguientes relaciones de los parámetros de ajuste A y B a partir de regresión lineal:

$$A = -35.343 + 1383 \cdot \%O_2' + 2.302 \cdot FO_2' - 0.465 \cdot x_{50}' \quad (8)$$

$$B = 28.210 + 0.110 \cdot \%O_2' + 0.667 \cdot FO_2' - 1.339 \cdot x_{50}' + 0.398 \cdot FO_2' \cdot x_{50}' \quad (9)$$

En las ecuaciones (8) y (9), los símbolos x_{50}' , $\%O_2'$ y FO_2' son la media central y variables adimensionales respectivamente, definidas por:

$$\%O_2' = (\%O_2 - 85)/15 \quad (10)$$

$$FO_2' = (FO_2 - 1.15)/0.15 \quad (11)$$

$$x_{50}' = (x_{50} - 64)/20 \quad (12)$$

donde:

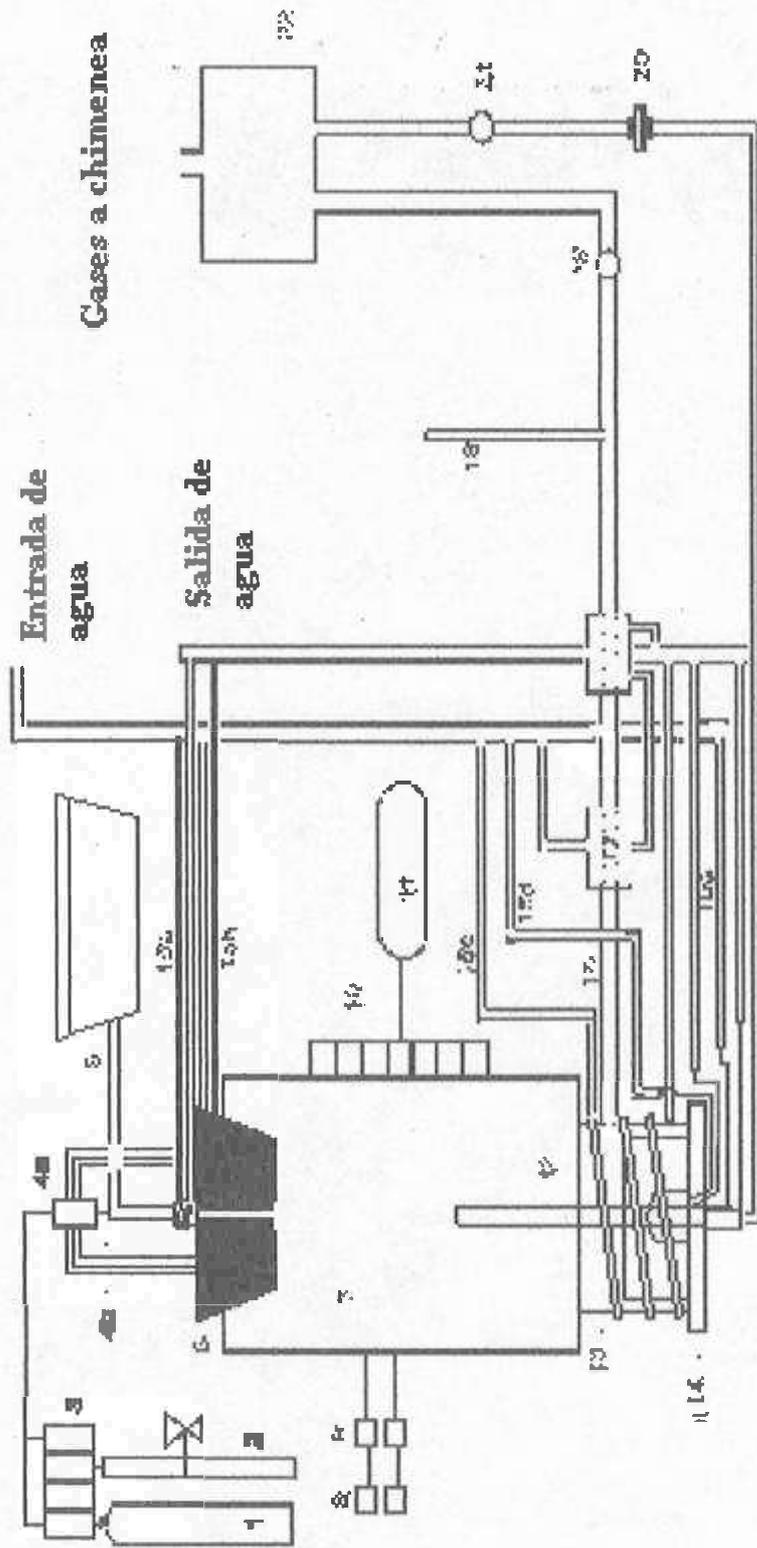
$\%O_2$ = Concentración de oxígeno en el gas de proceso, en % volumen.

FO_2 = Relación de alimentación oxígeno a mata, Kg O_2 /kg mata.

x_{50} = Tamaño de partícula correspondiente al 50% de la distribución acumulativa en peso de la alimentación.

El modelo fue desarrollado para las siguientes variables de proceso: alimentación de sólidos de 3 kg/h, tamaño de partícula menor de $<37 \mu\text{m}$, entre $37-74 \mu\text{m}$, $74-105 \mu\text{m}$ y $105-149 \mu\text{m}$, una mata de 70% en peso de cobre, concentración de oxígeno en la alimentación entre 70 y 100%, relación oxígeno a mata de 0.25 a 0.33 ton O_2 / ton de mata, y temperatura de pared de cámara de reacción de 1100 °C.

El error del modelo empírico con respecto a los datos experimentales se mantuvo en el rango de 3-9%, lo cual indica una concordancia razonable. El autor utilizó la función de distribución, ó función acumulativa, para describir el tamaño de las partículas en la alimentación y las partículas oxidadas. No obstante, el ajuste logrado no fue satisfactorio para reproducir las funciones de densidad de fracciones individuales de partículas. Esto es, las ecuaciones (7) a (12) no describen con exactitud la distribución relativa de los diferentes intervalos de tamaño de las poblaciones. Un ejemplo de lo anterior se muestra a continuación.



(1) Cilindro de oxígeno, (2) Aire comprimido, (3) Medidores de flujo de gas, (4a) Distribuidor de gas, (4b) Gas de proceso, (5) Alimentador de gusano, (6) Quemador, (7) Cámara de reacción, (8) Interruptores de energía eléctrica, (9) Controladores de temperatura, (10) Termopares, (11) Computadora, (12) Probeta de muestreo, (13) Sección de enfriamiento de partículas y gas, (14) Receptáculo colector de partículas, (15a)-(15e) Agua de enfriamiento, (16) Línea de gases de escape, (17) Intercambiador de calor, (18) manómetro, (19) Válvula de gas, (20) Muestreador de partículas, (21) Bomba de vacío, (22) Columna de lavado de gases.

Figura 7. Horno de conversión instantánea a nivel laboratorio (Riihilahti et al., 1997; Swartling, 1996)

En la Figura 8(a) se muestra el ajuste logrado por el autor para la función de distribución acumulativa de los productos de oxidación de un experimento particular. Se nota que el modelo empírico reproduce satisfactoriamente la tendencia general observada en los experimentos. El autor obtuvo un 98% de ajuste para la serie de datos experimentales en forma acumulada.

Por otro lado, para la función de densidad se utiliza la siguiente expresión:

$$f_3(x) = B / x \quad (13)$$

que corresponde a la derivada del modelo desarrollado por el autor, ecuación (7), donde:

$f_3(x)$ = Función de densidad, μm^{-1} .

B = Parámetro de ajuste.

x = Tamaño medio de partícula en μm .

La función de densidad correspondiente para el modelo desarrollado por el autor logra solamente 59% de ajuste, como se puede observar en la Figura 8(b).

Esto hace notar que la predicción cuantitativa de la función de distribución o acumulada, no garantiza una buena predicción de las distribuciones de tamaños de partícula individuales. Lo cual es particularmente importante si se desea estimar la cantidad de polvos generados durante la oxidación, así como el grado de fragmentación de las partículas grandes ó el comportamiento de las fracciones de la muestra que corresponden a cada intervalo. Por lo tanto, fue necesario continuar con el trabajo de Swartling (1996) para seleccionar un modelo que lograra una buena predicción de ambas distribuciones (función de densidad y función de distribución o acumulada), esto último es el objetivo principal del presente trabajo.

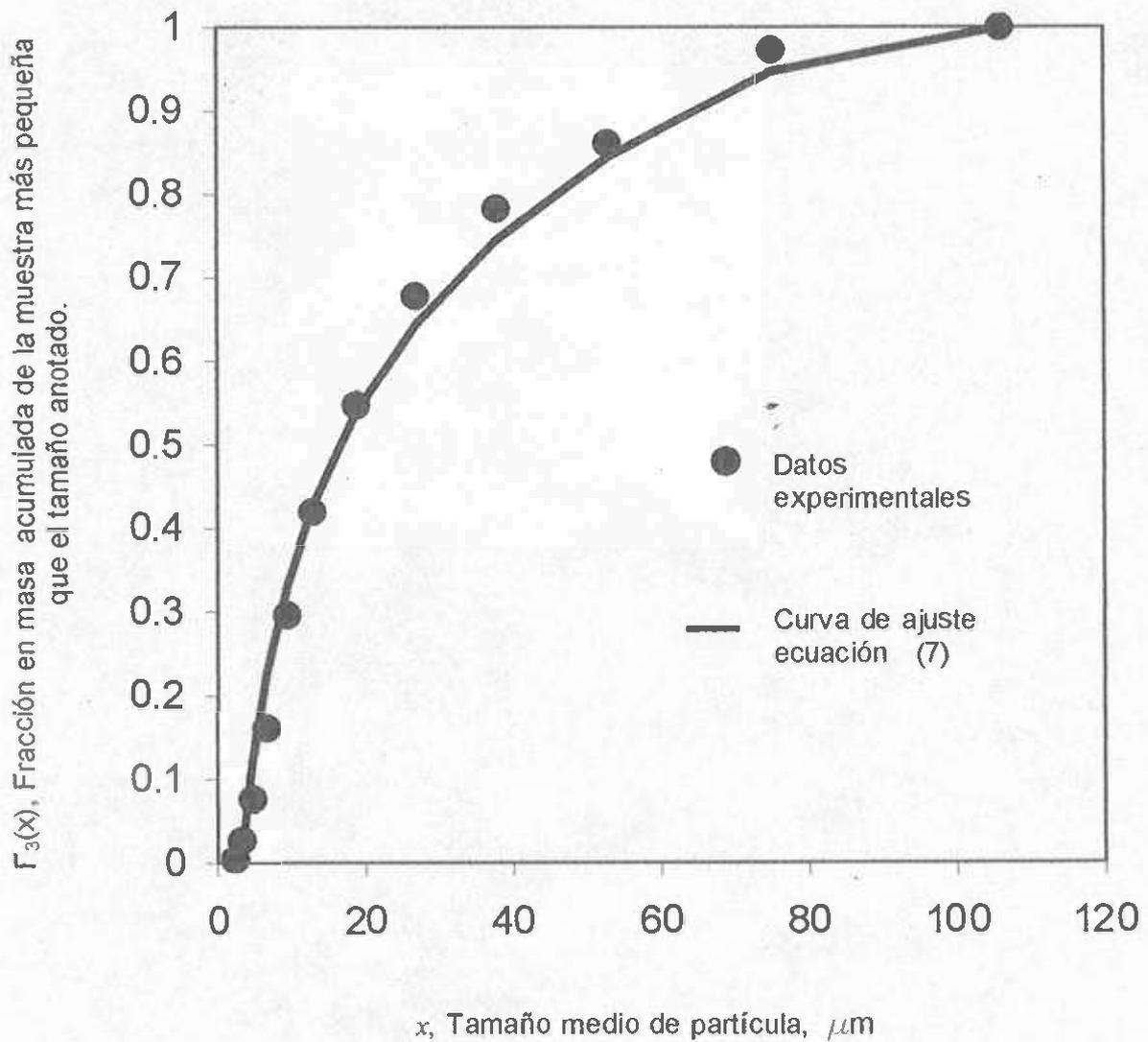


Figura 8(a). Comparación de la función de distribución acumulativa por número, calculada con la correlación de Swartling 1996) con datos experimentales de oxidación de matas sólidas de cobre (Alimentación: $<37\mu\text{m}$, 100% O_2 y $\text{FO}_2 = 1.0 \text{ kg O}_2/\text{kg mata}$).

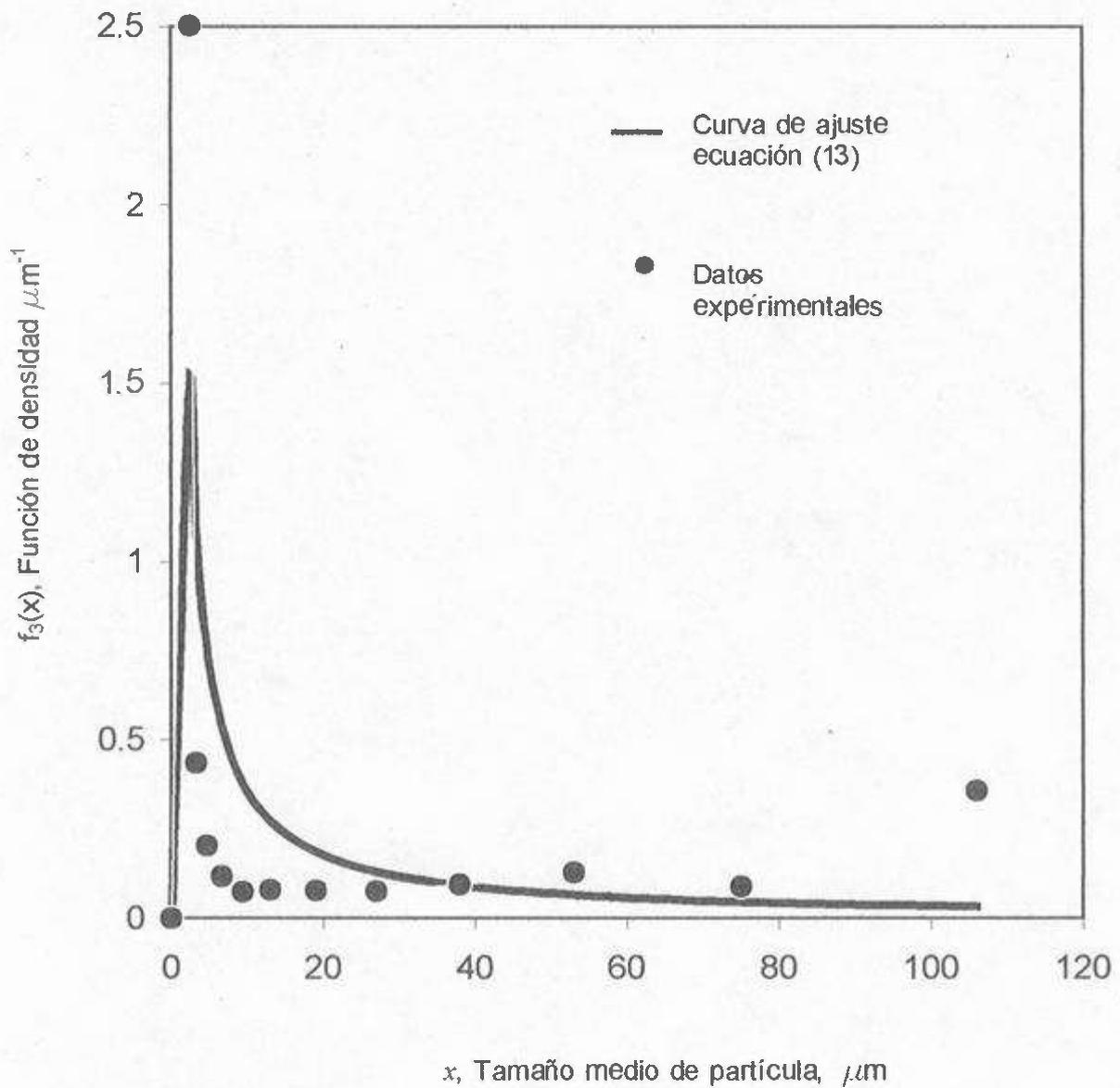


Figura 8 (b). Comparación de la función de densidad por número calculada con la correlación de Swartling (1996), con datos experimentales de oxidación de matas sólidas de cobre. (Alimentación $< 37 \mu\text{m}$, 100% O_2 y $\text{FO}_2 = 1.0 \text{ kg O}_2/\text{kg mata}$).



4. Metodología

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados en este trabajo, se siguió la estrategia general mostrada en la Figura 9. Esta consistió de las siguientes etapas:

a).- Selección por prueba y error de la función de densidad que mejor describió las distintas distribuciones de tamaño de las partículas alimentadas, así como de los productos oxidados.

b).- Utilizando un programa computacional para ajuste de curvas se ingresaron las funciones de densidad obtenidas experimentalmente y se obtuvieron los parámetros de ajuste para cada una de las distintas alimentaciones y sus correspondientes productos oxidados. Con este fin, se busco que los valores del parámetro de correlación r^2 fueran lo más cercano a la unidad. Este parámetro está definido como:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,e} - y_{i,c})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i,e} - \bar{y})^2} \quad (14)$$

donde:

$y_{i,e}$ = Valor de $f_3(x)$ experimental.

$y_{i,c}$ = Valor de $f_3(x)$ calculado por la correlación.

\bar{y} = Valor promedio de $f_3(x)$ experimental.

n = Número de puntos usados en la correlación.

Una vez obtenidos los parámetros de ajuste se realizó la integración de las

funciones de densidad ajustadas, cuidando que el valor máximo de la integral fuese 1. Posteriormente, se correlacionaron las curvas experimentales con sus respectivas integrales numéricas observando que las correlaciones entre las mismas r^2 tuvieran valores lo más cercano posible a la unidad.

c).- Comparación e interpretación de los resultados. A partir de la integración de las funciones de densidad, se calculó la generación de polvo el cual se define como partículas menores de $20 \mu\text{m}$ para cada una de las corridas experimentales. Es decir se evaluaron las integrales numéricas para $x \leq 20 \mu\text{m}$ de los productos oxidados y alimentaciones. La diferencia entre estos valores es la cantidad de polvo calculada la cual se comparó con el obtenido experimentalmente. Por último, se calculó el error de la función ajustada.

d).- Posteriormente se procedió a correlacionar los parámetros de ajuste con respecto a las condiciones de operación. Las condiciones de operación utilizadas para esta correlación fueron tamaño inicial de partícula y relación oxígeno - mata; no se utilizó la concentración de oxígeno en el gas de proceso ya que se observó que su efecto no fue significativo en los valores de los parámetros.

e).- Predicción de la generación de polvos. La expresión que se obtuvo calcula los parámetros del modelo empírico a partir de las variables de operación relación oxígeno – mata y tamaño inicial de partícula. Estos valores de los parámetros se ingresan en el modelo empírico para predecir la cantidad de polvo.

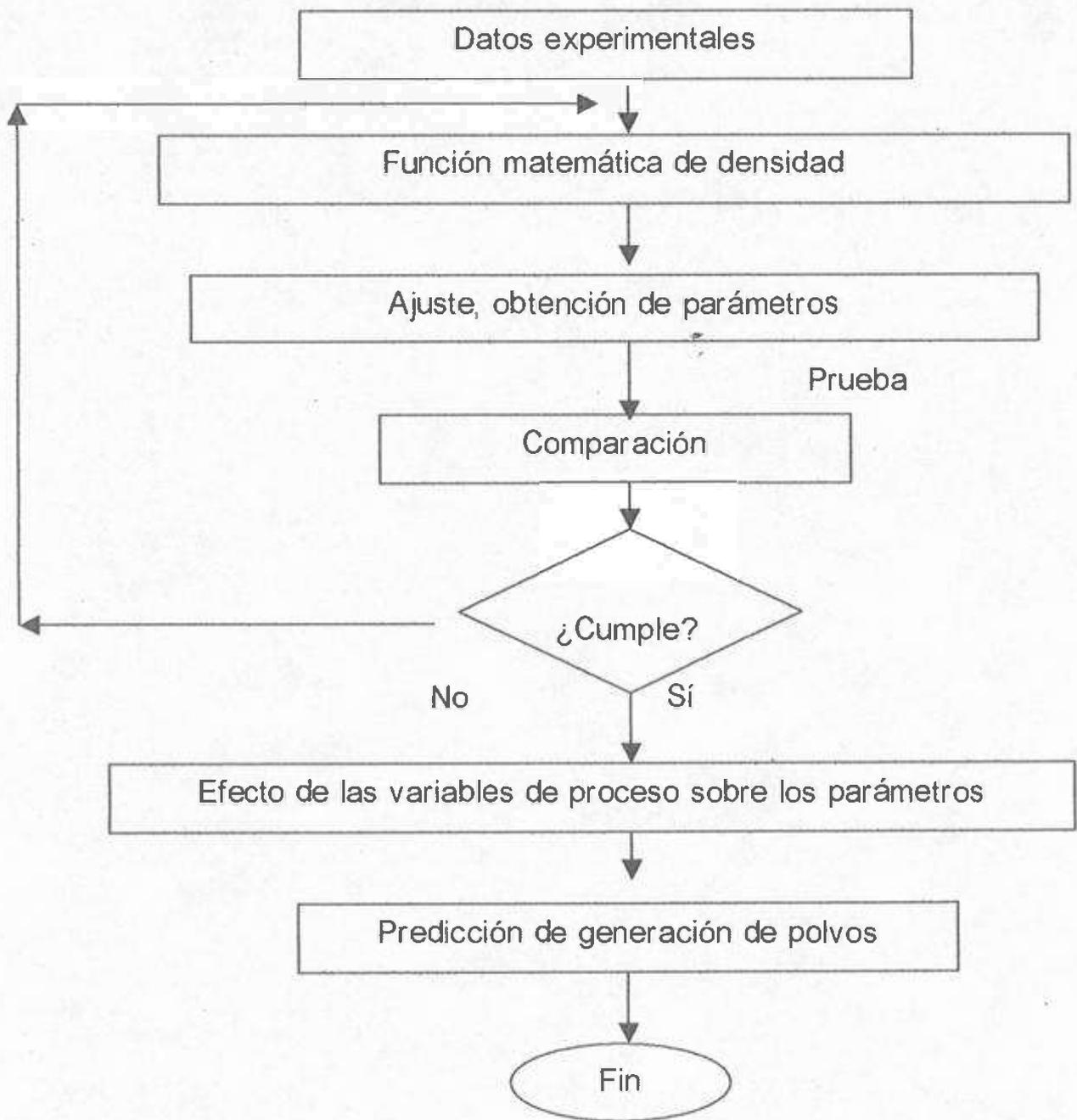


Figura 9. Estrategia general del proyecto

5. Discusión de Resultados

5.1 Correlación de Datos de Alimentación al Horno de Conversión

Como resultado del procedimiento mostrado en la Figura 5, después de probar con varias opciones de funciones de densidad se seleccionó la siguiente función de densidad para ajustar los datos de alimentación al horno:

$$f_3(x) = bx^c e^{-ax} \quad (15)$$

Esta expresión es una variante de la función de densidad Gamma:

$$f_3(x) = \left(\frac{\lambda}{\Gamma(n)}\right)(x\lambda)^{n-1} (e^{-x\lambda}) \quad (16)$$

donde:

$$a = \lambda \quad (17)$$

$$b = \frac{\lambda^n}{\Gamma(n)} \quad (18)$$

$$c = n - 1 \quad (19)$$

La función de densidad Gamma tiene la característica de ser muy flexible, es decir, para algunas situaciones en donde otras funciones de densidad fallan; esta función puede forzar a ajustar los datos. Al realizar el ajuste de las curvas de los datos de las cinco alimentaciones se lograron correlaciones del 82% para la alimentación 1. Figura 10(a) y superiores al 90% para las otras cuatro alimentaciones. Así mismo, la integral numérica de esta expresión logró una correlación superior al 90% de los datos acumulados para los cinco casos. Figura 10b.

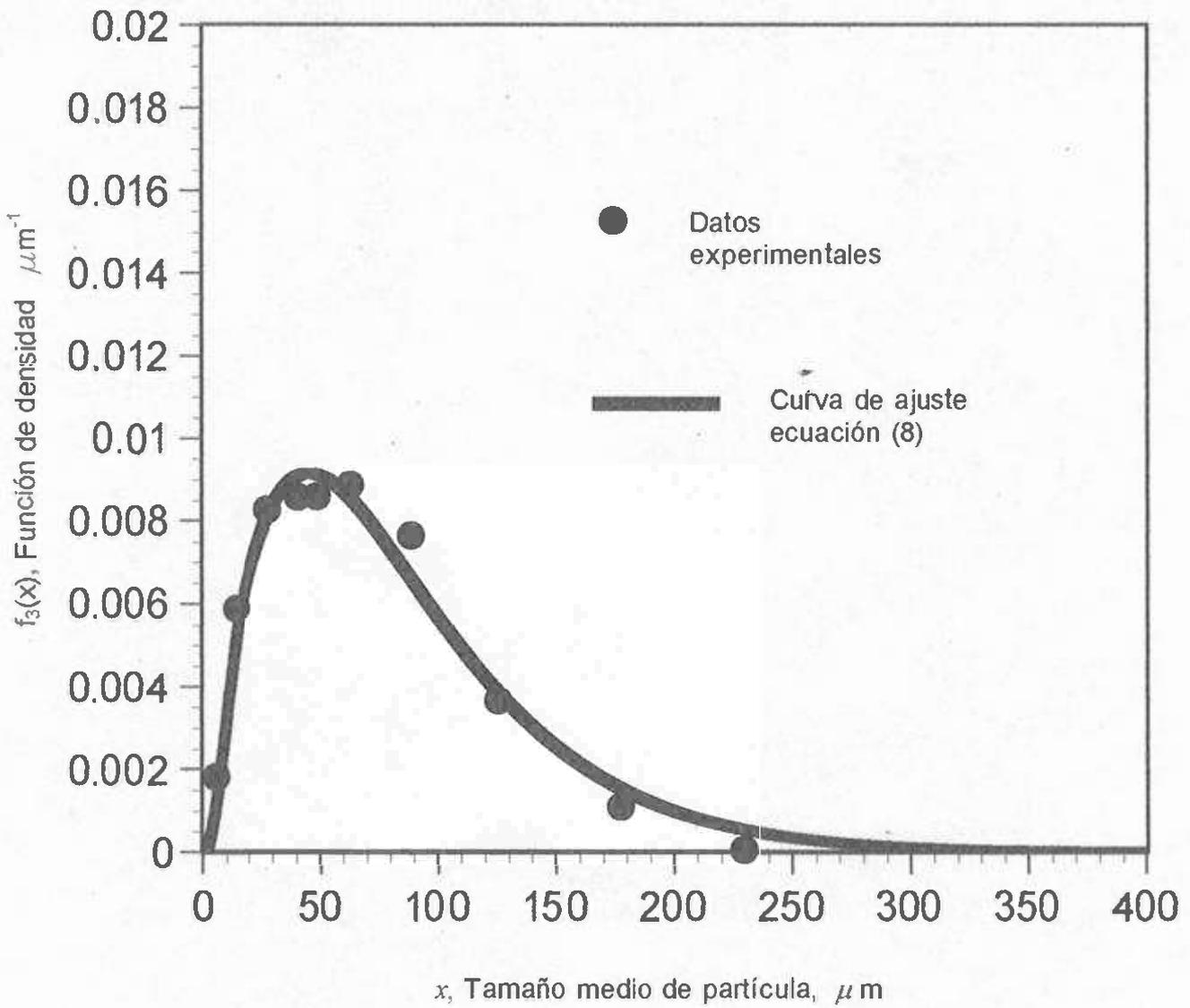


Figura 10a. Función de densidad $f_3(x)$, Comparación entre las predicciones de la correlación y los datos experimentales para la distribución de tamaños en la alimentación de $<149 \mu\text{m}$.

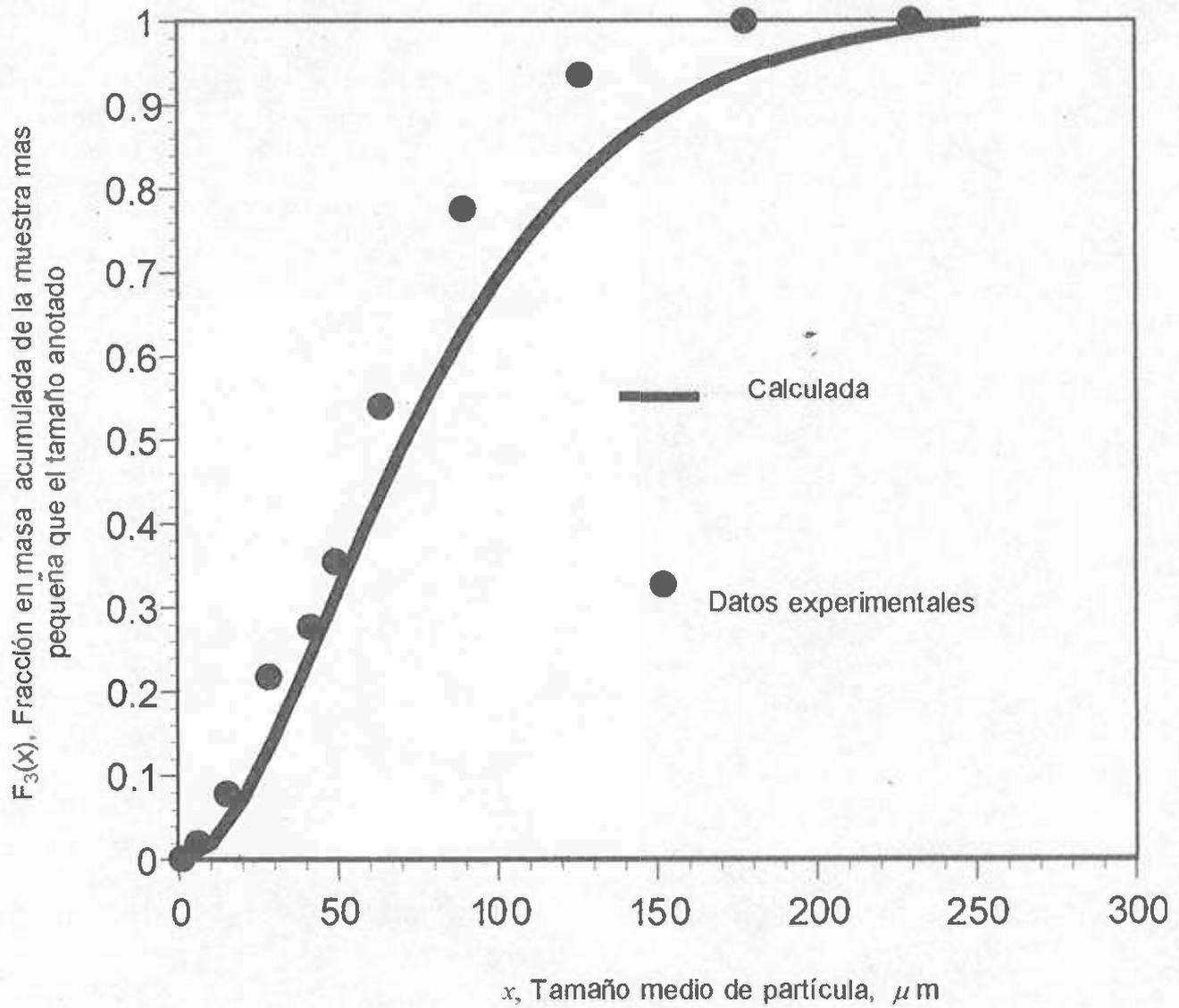


Figura 10b. Función acumulativa $F_3(x)$, Comparación entre las predicciones de la correlación y los datos experimentales para la distribución de tamaños en la alimentación de $<149 \mu\text{m}$.

La tabla I reporta los valores de los parámetros a, b y c obtenidos para las diferentes alimentaciones y la correlación r^2 lograda con el modelo propuesto.

Tabla I Valores de los parámetros de la ecuación (15) para las alimentaciones de mata al horno a nivel laboratorio.

Fracción de tamaño de partícula alimentado μm	a	b	c	r^2
< 37	0.04455772	0.00305153	0.8769679	0.82010
37 - 74	0.134625	8.722284e-12	7.222468	0.99389
74 - 105	0.1795359	2.21541e-27	16.33253	0.99434
105 - 149	0.1549191	3.55091e-33	18.6024	0.99044
<149	2.522257e-2	3.63080e-4	1.139268	0.97696

5.2 Correlación de Productos Oxidados

Para el ajuste de curvas de los datos de resultados experimentales se utilizó la expresión:

$$f_3(x) = bx^c e^{-ax} + b_1 x^{c_1} e^{-a_1 x} \quad (20)$$

Esta expresión es similar a la utilizada para las alimentaciones sólo que contiene seis parámetros. Esto se debe a que las funciones de densidad experimentales de los productos oxidados son bimodales, es decir, contienen dos máximos lo cual las hace difíciles de ajustar. Para las veinte corridas experimentales se lograron correlaciones superiores al 90% tanto para las funciones de densidad como para sus respectivas integrales numéricas comparadas con los datos experimentales. (Figura 11).

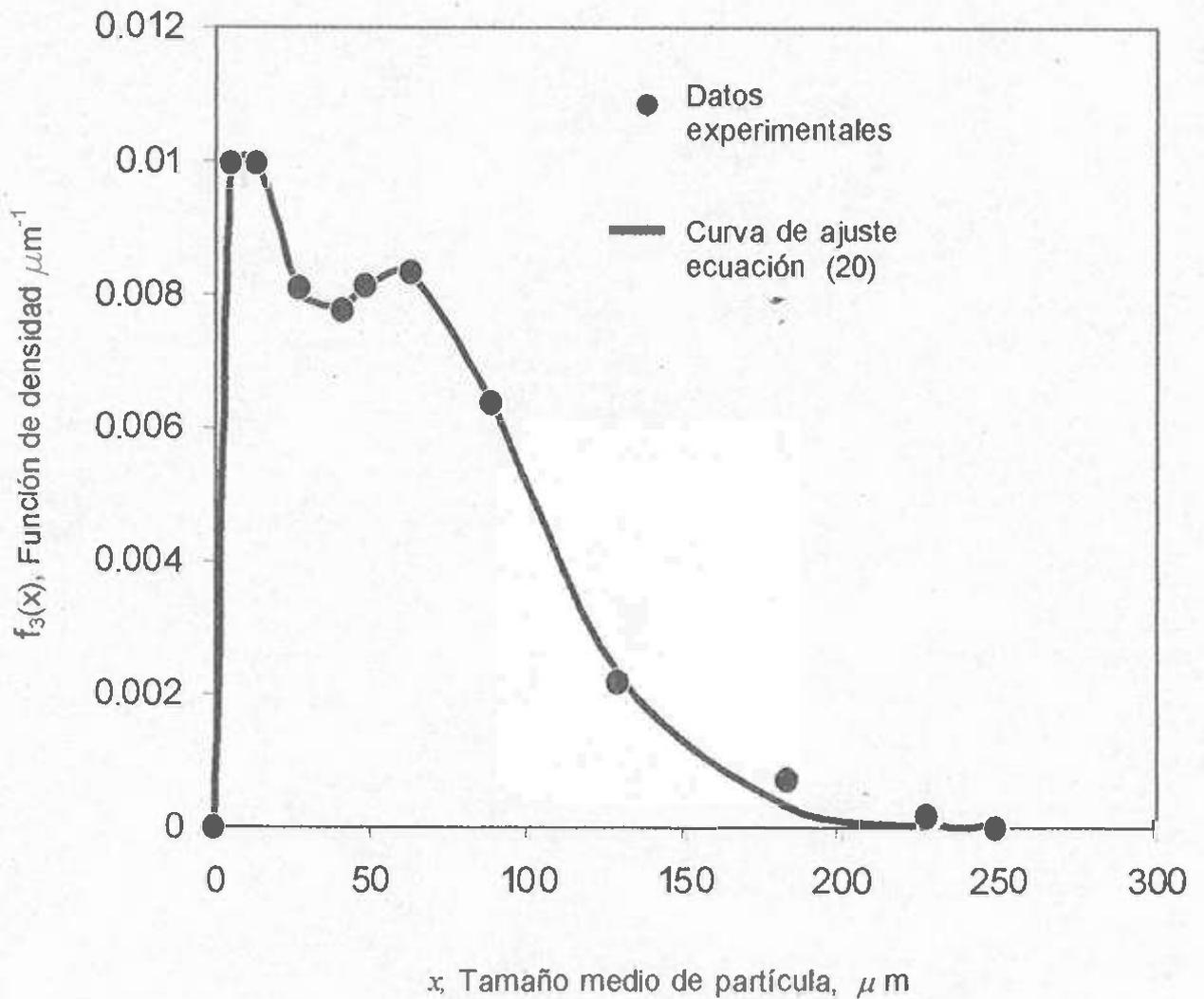


Figura 11a. Comparación entre las predicciones de la correlación y los datos experimentales para la distribución de tamaños en los productos de oxidación, función de densidad $f_3(x)$. Condiciones experimentales: 0.25 kg O_2 /kg mata, 70% O_2 , Tamaño de alimentación $<37 \mu\text{m}$.

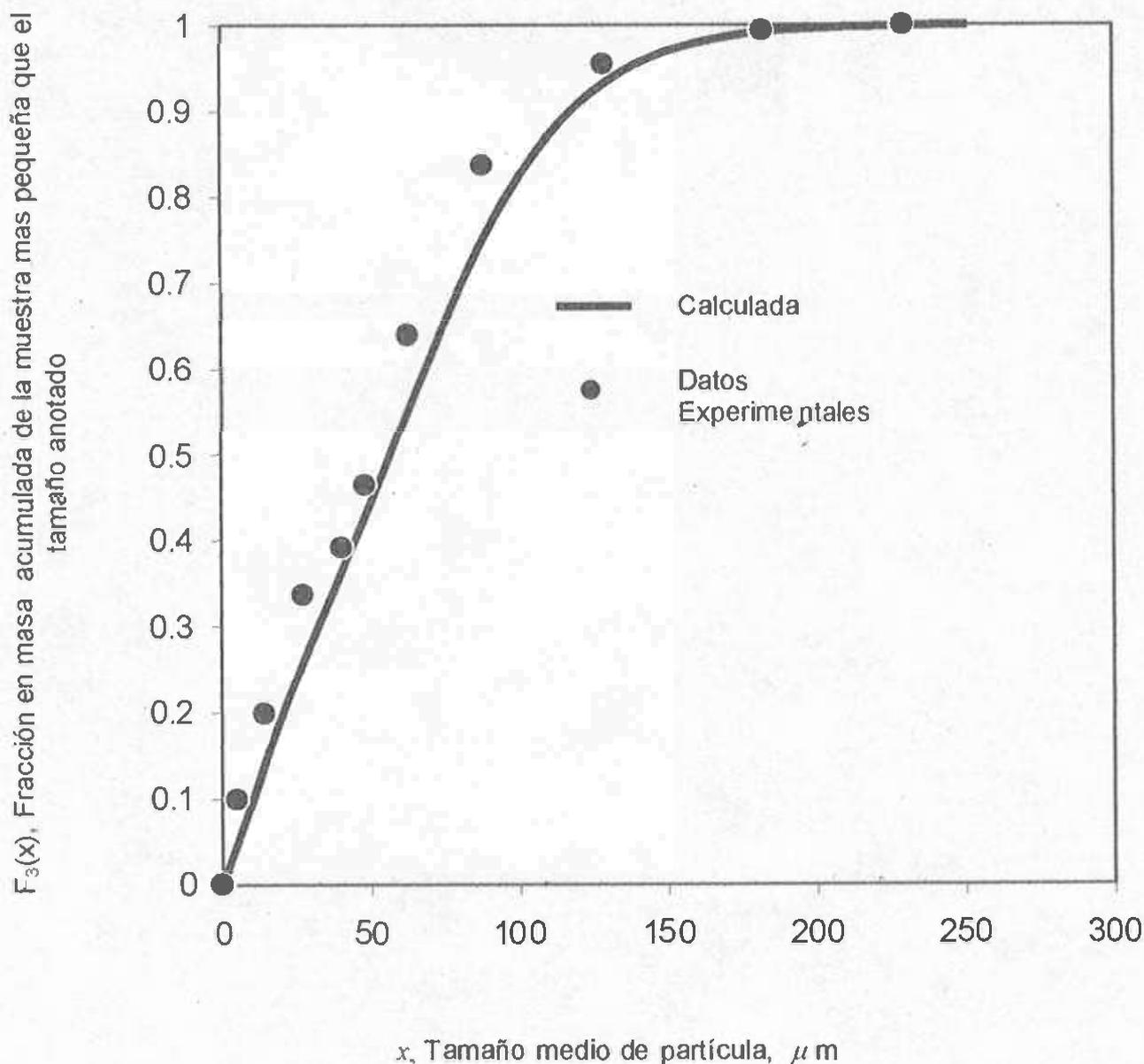


Figura 11b. Comparación entre las predicciones de la correlación y los datos experimentales para la distribución de tamaños en los productos de oxidación, función acumulativa $F_3(x)$. Condiciones experimentales: 0.25 kg O_2/kg mata, 70% O_2 , Tamaño de alimentación $<37 \mu\text{m}$.

A continuación la tabla II reporta los valores de los parámetros a , b , c , a_1 , b_1 y c_1 obtenidos para las diferentes corridas experimentales incluyendo la correlación r^2 lograda con el modelo propuesto.

Tabla II Valores de los parámetros de la ecuación (20) para los diferentes productos oxidados.

Experimento N ^o .	X (μm)	Rel. O ₂ /mata kg O ₂ /kg mata	Concentración de O ₂ en gas de proceso % vol.	a x 10 ²	b x 10 ⁹	c	a ₁ x 10 ²	b ₁ x 10 ³	c ₁	r ²
1	<37	0.25	70	6.40	7.89	4.30	6.20	6.17	0.525	0.9987
2	<37	0.33	70	6.45	2.44	4.48	5.69	15.8	0.358	0.9999
3	<37	0.25	100	7.46	6.98 x 10 ⁻¹	4.93	9.73	4.25	0.944	0.9998
4	<37	0.33	100	5.29	59.6	3.50	8.29	9.86	0.447	0.9995
5	37-74	0.25	70	10.6	1.96 x 10 ⁻²	6.51	10.2	2.45	0.948	0.9979
6	37-74	0.33	70	7.28	5.63 x 10 ⁻¹	4.92	12.8	1.45	1.29	0.9995
7	37-74	0.25	100	10.0	1.73 x 10 ⁻²	6.46	7.63	3.88	0.661	0.9983
8	37-74	0.33	100	7.73	6.23 x 10 ⁻⁴	6.65	5.70	7.83	0.666	0.9994
9	74-105	0.25	70	9.61	1.16 x 10 ⁻⁶	8.54	11.2	2.33	0.981	0.9743
10	74-105	0.33	70	10.3	2.83 x 10 ⁻⁷	8.99	7.93	4.01	0.885	0.9983
11	74-105	0.25	100	10.1	1.22 x 10 ⁻⁶	8.65	11.3	1.71	1.09	0.9851
12	74-105	0.33	100	7.84	1.45 x 10 ⁻⁶	8.07	4.43	10.2	0.362	0.9966
13	105-149	0.25	70	8.86	6.17 x 10 ⁻⁹	9.51	5.63	6.02	0.382	0.9845
14	105-149	0.33	70	9.87	1.33 x 10 ⁻¹²	11.5	2.95	9.62	0.273	0.9862
15	105-149	0.25	100	9.79	1.14 x 10 ⁻¹¹	11.1	3.11	7.67	0.215	0.9932
16	105-149	0.33	100	9.06	1.42 x 10 ⁻¹⁰	10.3	4.76	11.3	0.271	0.9973
17	<149	0.25	70	7.13	2.20 x 10 ⁻³	6.37	4.59	1.76	0.540	0.9933
18	<149	0.33	70	8.64	6.52 x 10 ⁻⁴	6.92	9.48	3.68	0.753	0.9902
19	<149	0.25	100	5.80	1.63 x 10 ⁻¹	4.96	11.8	1.64	1.05	0.9499
20	<149	0.33	100	6.66	5.40 x 10 ⁻¹	4.89	10.8	3.27	0.905	0.9931

Una vez obtenidos los parámetros de ajuste de curvas se procedió a expresarlos como función de las variables de operación. En la Tabla III se incluyen los parámetros obtenidos de acuerdo a la expresión:

$$p = \beta_1 \hat{x}_f + \beta_2 \hat{x}_f^2 + \beta_3 R \quad (21)$$

donde "p" es el parámetro generalizado de correlación (a, b, etc.), \hat{x}_f es el tamaño medio de partícula del material alimentado en μm , y R es la relación oxígeno/mata alimentado, $\text{kgO}_2/\text{kg mata}$. En esta expresión, el tamaño medio está definido como:

$$\hat{x}_f = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} x f_3(x) dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f_3(x) dx} \quad (22)$$

donde x_{min} y x_{max} son los tamaños mínimo y máximo, respectivamente, en la alimentación, y $f_3(x)$ es la función de densidad de la alimentación.

Tabla III Valores de los parámetros β_1 , β_2 y β_3 para la ecuación (21).

Parámetro p	$\beta_1 \times 10^3$	$\beta_2 \times 10^5$	$\beta_3 \times 10^2$	r^2
a	1.7473	-0.7845	-0.71161	0.977
$b^{0.01}$	11.879	-7.6370	121.50	0.988
c	75.519	-0.4088	261.47	0.989
a_1	3.0516	-1.9495	-8.2286	0.923
b_1	-0.3670	0.21865	6.5654	0.879
c_1	34.888	-21.927	-173.27	0.916

Los resultados anteriores indican que la presente correlación logra un acercamiento aceptable con los datos experimentales. Las correlaciones que se obtienen en general son superiores al 90% para las veinte corridas experimentales reportadas por los autores. Por lo tanto, el modelo seleccionado cumple con la condición de exactitud y puede ser utilizado para estudios posteriores.

5.3 Predicción de la Generación de Polvos Durante la Oxidación

En la Tabla IV se hace un comparativo de la estimación de polvo que están definidas como las partículas menores de $20 \mu\text{m}$. Utilizando los resultados de las integrales numéricas contra los resultados experimentales, se puede apreciar que se logró muy buena concordancia entre ellos, con valores que se encuentran en el mismo orden de magnitud. Incluso se puede afirmar que la diferencia existente se encuentra dentro del margen de error cometido durante la realización de los experimentos, el cual fue aproximadamente 15%.

Tabla IV Resumen de datos de generación de polvo^a de los experimentos con mata de 72% de cobre en el horno a nivel laboratorio y su comparación con el calculado por la presente correlación.

Tamaño de partícula en la alimentación (μm)	Conc. de O ₂ en gas de proceso (% vol.)	Relación O ₂ / mata (kg O ₂ / kg mata)	^b Generación de polvo experimental %	Generación de polvo calculado %
< 37	70	0.25	-7.0	-6.0 ^b
< 37	70	0.33	8.0	9.0
< 37	100	0.25	6.0	4.0
< 37	100	0.33	6.0	4.0
37 - 74	70	0.25	13.0	12.0
37 - 74	70	0.33	25.0	23.0
37 - 74	100	0.25	13.0	11.0
37 - 74	100	0.33	26.0	28.0
74 - 105	70	0.25	14.0	14.0
74 - 105	70	0.33	20.0	18.0
74 - 105	100	0.25	12.0	12.0
74 - 105	100	0.33	20.0	20.0
105 - 149	70	0.25	13.0	11.0
105 - 149	70	0.33	15.0	13.0
105 - 149	100	0.25	12.0	10.0
105 - 149	100	0.33	19.0	16.0
< 149	70	0.25	0.0	-2.0
< 149	70	0.33	8.0	7.0
< 149	100	0.25	11.0	10.0
< 149	100	0.33	16.0	16.0

^aPartículas de tamaño igual o menor a 20 μm .

^bValor negativo indica una disminución en la cantidad de polvo con respecto a la alimentación.

Esto representa un avance considerable con relación al ajuste desarrollado por Swartling (1996), y discutido con anterioridad.

El análisis de los datos experimentales indicó que la variable que en mayor grado afectó a los cambios de tamaño de las partículas, así como a la generación de polvo, fué la relación oxígeno-mata, seguido por el tamaño de partícula inicial, mientras que la concentración de oxígeno en el gas de proceso no la afectó significativamente. Es decir:

$$kg O_2 / kg \text{ mata} > x > Conc. O_2$$

Es de interés observar que los parámetros de la presente correlación mostraron esta misma dependencia con respecto a las condiciones de operación, (ecuación 14). Es decir, la presente correlación logró capturar los efectos fenomenológicos globales de las variables de operación. Este es un logro adicional e independiente al del ajuste numérico de los datos experimentales, y sugiere que, en principio, los parámetros de la correlación pudieran tener significado físico en base a un mecanismo fenomenológico de fragmentación. La formulación de un mecanismo fenomenológico de fragmentación estuvo más allá de los alcances del presente estudio.

5.4 Observaciones Finales

El modelo propuesto anteriormente si bien no puede aplicarse directamente para predecir la cantidad de polvo que se generaría en un horno de conversión instantánea a nivel industrial, si proporciona una idea global de la que se esperaría obtener de acuerdo a las condiciones de operación.

El efecto producido por las variables de operación probadas en el horno a nivel laboratorio y su orden de magnitud que es: Relación Oxígeno / Mata > tamaño medio inicial de partícula > Concentración de Oxígeno debe ser similar al que se produce en el horno de conversión instantánea a nivel industrial. Por lo tanto, es necesario realizar más investigación para elaborar un modelo fenomenológico de fragmentación de partículas que logre describir cuantitativamente el mecanismo de fragmentación mostrado en la Figura 6.

6. Conclusiones

Como conclusiones de este trabajo se tiene que:

- a) Se desarrolló una correlación matemática para la distribución de tamaños de partículas de matas sólidas de cobre oxidadas a altas temperaturas en un horno a nivel laboratorio.
- b) La correlación desarrollada permite de estimar las funciones de densidad y las funciones acumuladas de las partículas de la alimentación y los productos oxidados con una precisión razonable con respecto a los datos experimentales (80-99%), mientras que todas las correlaciones logradas entre las curvas descritas por los datos acumulados y las calculadas por medio de integración numérica fueron superiores al 90 % .
- c) Los parámetros de la correlación se expresaron como funciones de las variables de operación: relación oxígeno / mata y tamaño medio inicial de partícula, excluyéndose la concentración de oxígeno en el gas de proceso ya que se observó que no afectó significativamente los parámetros de la correlación.

- d) La correlación desarrollada puede utilizarse para estimar la cantidad de polvos generados durante la oxidación de partículas de matas sólidas de cobre a altas temperaturas en el horno de conversión instantánea a nivel laboratorio, lo que indica su uso potencial a nivel industrial.
- e) Por último, se obtuvo un modelo empírico que correlaciona satisfactoriamente tanto la función de densidad como la función de distribución ó acumulada de los cambios de tamaño de partículas de matas sólidas de cobre oxidadas a altas temperaturas, lo cual no se había realizado con anterioridad. El modelo propuesto incluso capturó el efecto que producen las variables de operación sobre la generación de polvo, lo cual es un logro adicional e independiente del ajuste de curvas experimentales.

7. Referencias

Anjala Y Asteljoki J. Y Hanniala P. En *Proceedings of the International Symposium on the Impact of Oxygen on the Productivity of Non-Ferrous Metallurgical Processes*; Kachaniwsky G., Newman C.; Eds. Vol 2, Pergamon: Toronto, 1987, pp 87-105.

Asteljoki, J.A.; Bailey, L.K.; George, D.B. Y Rodloff, D.W. *J. Metals* 1985.

Asteljoki, J.A.; Kytö, S.M. Presentado en 115th Annual Meeting of the Minerals, Metals and Materials Society, New Orleans, LA, 1986; paper A86-57.

Foust, A.S., Wenzel, L.A., Clump, C.W., Maus, L. Y Andersen, L.B. *Principios de Operaciones Unitarias*, CECSA, E.U. 1978.

George, D.B.; Gottling, R.J. Y Newman, C.J. En *Proceedings of Copper 95 - Cobre 95 International Conference Volume IV: Pyrometallurgy of Copper*, Chen, W.J.; Díaz, C.; Luraschi, A.; Mackey, P.J., Eds., The Metallurgical Society of CIM: Montreal, 1995, pp41-52.

Jiao, Q.; Wu, L. Y Themelis, N.J. En *Mathematical Modeling of Material Processing Operations*; Szekeley, J.; Hales, L.B.; Suominen, R.; Jokilaakso, A.; Taskinen, P.; Lilius, K. *Trans. Inst. Min. Metall.* 1991, 100, C79-C90.

Kelly, E.G. Y Spottiswood, D.J. En *Introduction to Mineral Processing*, Wiley: New York, 1982.

Pérez-Tello, M., Tesis de Doctorado, University of Utah, 1999.

Pérez Tello, M., Sohn, H.Y., StMarie, K., Y Jokilaakso, A. En *Experimental Investigation and 3-D Computational Fluid Dynamics Modeling of the Flash Converting Furnance Shaft. Parte I: Experimental Observations of Copper Converting Reactions in Terms of Converting Rate, Converting Quality, Changes in Particle Size, Morphology, and Mineralogy.* Aceptado Para su Publicación en *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2001 a.

Pérez Tello, M., Sohn Y Smith, P.J. En *Experimental Investigation and 3-D Computational Fluid Dynamics Modeling of the Flash Converting Furnance Shaft. Parte II: Formulation of 3-D Computational Fluid Dynamics Model Incorporating the Particle Cloud Description,* Aceptado Para su Publicación en *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2001 b.

Rajamani, R.K.; En *Mathematical Modeling of Extractive Metallurgical Processes* (Notas de Clase), University of Utah, Department of Metallurgical Engineering. September 1994.

Riihilahti, K.M.; Licenciante Thesis, Helsinki University of Technology , 1997.

Sohn, H.Y. Y Ramachandran, V. En *Sulfide Smelting '98: Current and Future Practices*, Asteljoki, J.A.; Stephens, R.L.; Eds., TMS-AIME: Warrendale, PA., 1998; pp 3-37.

Shook, A.A.; Richards, G.G. Y Brimacombe, J.K. *Metall. Mat. Trans.* 1995, 26B, 719-729.

Suominen, R.O.; Jokilaakso, A.T.; Taskinen, P.A. Y Lilius, K.R. *Scan. J. Metallurgy* 1991, 20, 245 - 250.

Swartling, D., Tesis de Maestría, Royal Institute of Technology S-100 44 Stockholm, Feb. 1996.

8. Apéndice:

Funciones de densidad experimentales con mata de 72% reportados por Riihilahti et al. (1997) y Perez-Tello et al. (2001)

Alimentación No. 1		<37 μm	
<dp>	x, μm	$f_3(x)$	$F_3(x)$
	5	0.00561	0
	14.14214	0.02106	0.0561
	27.20294	0.022712	0.2667
	40.34848	0.010957	0.6528
	48.29079	0.005989	0.7295
	62.62587	0.002967	0.7834
	88.1476	0.001797	0.8457
	125.08	0.001334	0.9014
	176.8898	0.000654	0.9601
	229.1288	0	1
Alimentación No. 2		37-74 μm	
<dp>	x, μm	$f_3(x)$	$F_3(x)$
	5	0.0001	0
	14.14214	0.0004	0.001
	27.20294	0.004241	0.005
	40.34848	0.014514	0.0771
	48.29079	0.0188	0.1787
	62.62587	0.016395	0.3479
	88.1476	0.00689	0.6922
	125.08	0.001634	0.9058
	176.8898	0.000366	0.9777
	229.1288	0	1

Alimentación No. 3 74-105 μ m

<dp> x, μ m	$f_3(x)$	$F_3(x)$
5	0.0001	0
14.14214	0	0.001
27.20294	5.88E-05	0.001
40.34848	0.000314	0.002
48.29079	0.000856	0.0042
62.62587	0.00591	0.0119
88.1476	0.015968	0.136
125.08	0.006305	0.631
176.8898	0.001269	0.9084
229.1288	0.000355	0.9858

Alimentación No. 4 105-149 μ m

<dp> x, μ m	$f_3(x)$	$F_3(x)$
5	0.00021	0
14.14214	0.00004	0.0021
27.20294	3.53E-05	0.0025
40.34848	0.000171	0.0031
48.29079	0.000178	0.0043
62.62587	0.000624	0.0059
88.1476	0.005977	0.019
125.08	0.013275	0.2043
176.8898	0.002592	0.7884
229.1288	0.001338	0.9465

Alimentación No. 5 < 149 μm

$\langle dp \rangle$	$x, \mu\text{m}$	$f_3(x)$	$F_3(x)$
	5	0.00179	0
	14.14214	0.00587	0.0179
	27.20294	0.008224	0.0766
	40.34848	0.008543	0.2164
	48.29079	0.008544	0.2762
	62.62587	0.008829	0.3531
	88.1476	0.007613	0.5385
	125.08	0.003625	0.7745
	176.8898	0.00107	0.934
	229.1288	1.75E-05	0.9993

Experimento No. 1 (0.25 kg O_2 / kg mata, < 37 μm , 70% O_2)

$\langle dp \rangle$	$x, \mu\text{m}$	$f_3(x)$	$F_3(x)$
	5	0.00995	0
	14.14214	0.00998	0.0995
	27.20294	0.008088	0.1993
	40.34848	0.007771	0.3368
	48.29079	0.008133	0.3912
	62.62587	0.008348	0.4644
	88.1476	0.006365	0.6397
	128.8022	0.002217	0.837
	182.1538	0.00074	0.9545
	229.1288	0.000175	0.993

Experimento No. 2 (0.33 kg O₂ / kg mata, < 37 μm, 70% O₂)

<dp> x, μm	f₃(x)	F₃(x)
5	0.01854	0
14.14214	0.01611	0.1854
27.20294	0.010588	0.3465
40.34848	0.007771	0.5265
48.29079	0.006867	0.5809
62.62587	0.005976	0.6427
88.1476	0.004294	0.7682
125.08	0.0017	0.9013
176.8898	0.000352	0.9761
229.1288	6E-05	0.9976

Experimento No. 3 (0.25 kg O₂ / kg mata, < 37 μm, 100% O₂)

<dp> x, μm	f₃(x)	F₃(x)
5	0.01545	0
14.14214	0.0171	0.1545
27.20294	0.010212	0.3255
40.34848	0.007214	0.4991
48.29079	0.006822	0.5496
62.62587	0.006624	0.611
88.1476	0.004919	0.7501
128.8022	0.001436	0.9026
182.1538	0.000394	0.9787
229.1288	2E-05	0.9992

Experimento No. 4 (0.33 kg O₂ / kg mata, < 37 μm, 100% O₂)

<dp>	x, μm	f₃(x)	F₃(x)
	5	0.01836	0
	14.14214	0.01411	0.1836
	27.20294	0.008224	0.3247
	40.34848	0.0066	0.4645
	48.29079	0.006378	0.5107
	62.62587	0.006224	0.5681
	88.1476	0.005113	0.6988
	125.08	0.002341	0.8573
	176.8898	0.000569	0.9603
	229.1288	0.000125	0.995

Experimento No. 5 (0.25 kg O₂/ kg mata, 37-74 μm, 70% O₂)

<dp>	x, μm	f₃(x)	F₃(x)
	5	0.00639	0
	14.14214	0.00684	0.0639
	27.20294	0.005718	0.1323
	40.34848	0.008543	0.2295
	48.29079	0.011122	0.2893
	62.62587	0.012833	0.3894
	88.1476	0.007503	0.6589
	125.08	0.00192	0.8915
	176.8898	0.000354	0.976
	229.1288	6E-05	0.9976

Experimento No.6 (0.33 kg O₂/ kg mata, 37-74 μm, 70% O₂)

<dp>	x, μm	f₃(x)	F₃(x)
	5	0.01151	0
	14.14214	0.01384	0.1151
	27.20294	0.007729	0.2535
	40.34848	0.006229	0.3849
	48.29079	0.006922	0.4285
	62.62587	0.007986	0.4908
	88.1476	0.006365	0.6585
	125.08	0.002439	0.8558
	176.8898	0.00053	0.9631
	229.1288	0.000115	0.9954

Experimento No. 7 (0.25 kg O₂/ kg mata, 37-74 μm, 100% O₂)

<dp>	x, μm	f₃(x)	F₃(x)
	5	0.00679	0
	14.14214	0.00678	0.0679
	27.20294	0.005776	0.1357
	40.34848	0.007843	0.2339
	48.29079	0.010178	0.2888
	62.62587	0.012067	0.3804
	88.1476	0.007939	0.6338
	125.08	0.002152	0.8799
	176.8898	0.000379	0.9746
	229.1288	5.75E-05	0.9977

Experimento No. 8 (0.33 kg O₂/ kg mata, 37-74 μm, 100% O₂)

<dp>	x, μm	f₃(x)	F₃(x)
	5	0.01242	0
	14.14214	0.01463	0.1242
	27.20294	0.011182	0.2705
	40.34848	0.007429	0.4606
	48.29079	0.006389	0.5126
	62.62587	0.005748	0.5701
	88.1476	0.004955	0.6908
	125.08	0.002525	0.8444
	176.8898	0.000633	0.9555
	229.1288	0.000148	0.9941

Experimento No. 9 (0.25 kg O₂/ kg mata, 74-105 μm, 70% O₂)

<dp>	x, μm	f₃(x)	F₃(x)
	5	0.00701	0
	14.14214	0.00678	0.0701
	27.20294	0.0037	0.1379
	40.34848	0.002286	0.2008
	48.29079	0.002744	0.2168
	62.62587	0.006338	0.2415
	88.1476	0.011242	0.3746
	125.08	0.004911	0.7231
	176.8898	0.00089	0.9392
	229.1288	0.000163	0.9935

Experimento No. 10 (0.33 kg O₂/ kg mata, 74-105 μm, 70% O₂)

<dp> x, μm	f₃(x)	F₃(x)
5	0.00907	0
14.14214	0.01094	0.0907
27.20294	0.007206	0.2001
40.34848	0.004329	0.3226
48.29079	0.004311	0.3529
62.62587	0.005967	0.3917
88.1476	0.008119	0.517
125.08	0.003993	0.7687
176.8898	0.00083	0.9444
229.1288	0.000125	0.995

Experimento No.11 (0.25 kg O₂/ kg mata, 74-105 μ m, 100% O₂)

<dp> x, μ m	f₃(x)	F₃(x)
5	0.00586	0
14.14214	0.00636	0.0586
27.20294	0.003535	0.1222
40.34848	0.002529	0.1823
48.29079	0.003311	0.2
62.62587	0.00731	0.2298
88.1476	0.011442	0.3833
125.08	0.004689	0.738
176.8898	0.000849	0.9443
229.1288	9.75E-05	0.9961

Experimento No.12 (0.33 kg O₂/ kg mata, 74-105 μm, 100% O₂)

<dp> x, μm	f₃(x)	F₃(x)
5	0.01056	0
14.14214	0.01005	0.1056
27.20294	0.007594	0.2061
40.34848	0.005029	0.3352
48.29079	0.004233	0.3704
62.62587	0.004395	0.4085
88.1476	0.005968	0.5008
125.08	0.004705	0.6858
176.8898	0.001449	0.8928
229.1288	0.00047	0.9812

Experimento No.13 (0.25 kg O₂/ kg mata, 105-149 μm, 70% O₂)

<dp> x, μm	f₃(x)	F₃(x)
5	0.00735	0
14.14214	0.00615	0.0735
27.20294	0.004435	0.135
40.34848	0.002629	0.2104
48.29079	0.002122	0.2288
62.62587	0.002671	0.2479
88.1476	0.007542	0.304
125.08	0.00778	0.5378
176.8898	0.001872	0.8801
229.1288	0.000142	0.9943

Experimento No.14 (0.33 kg O₂/ kg mata, 105-149 μm, 70% O₂)

<dp> x, μm	f₃(x)	F₃(x)
5	0.00791	0
14.14214	0.00758	0.0791
27.20294	0.006847	0.1549
40.34848	0.005029	0.2713
48.29079	0.004044	0.3065
62.62587	0.003548	0.3429
88.1476	0.005455	0.4174
125.08	0.00615	0.5865
176.8898	0.002008	0.8571
229.1288	0.00051	0.9796

Experimento No.15 (0.25 kg O₂/ kg mata, 105-149 μm, 100% O₂)

<dp> x, μm	f₃(x)	F₃(x)
5	0.00672	0
14.14214	0.00604	0.0672
27.20294	0.005088	0.1276
40.34848	0.003657	0.2141
48.29079	0.003044	0.2397
62.62587	0.003181	0.2671
88.1476	0.006461	0.3339
125.08	0.007193	0.5342
176.8898	0.002179	0.8507
229.1288	0.00041	0.9836

Experimento No.16 (0.33 kg O₂/kg mata, 105-149 μm, 100% O₂)

<dp> x, μm	f₃(x)	F₃(x)
5	0.01055	0
14.14214	0.00883	0.1055
27.20294	0.006118	0.1938
40.34848	0.003471	0.2978
48.29079	0.002667	0.3221
62.62587	0.002762	0.3461
88.1476	0.005368	0.4041
125.08	0.006434	0.5705
176.8898	0.002113	0.8536
229.1288	0.000438	0.9825

Experimento No. 17 (0.25 kg O₂/ kg mata, < 149 μm, 70% O₂)

<dp> x, μm	f₃(x)	F₃(x)
5	0.00298	0
14.14214	0.00333	0.0298
27.20294	0.003182	0.0631
40.34848	0.003714	0.1172
48.29079	0.004522	0.1432
62.62587	0.007033	0.1839
88.1476	0.0095	0.3316
125.08	0.005695	0.6261
176.8898	0.001782	0.8767
229.1288	0.000365	0.9854

Experimento No. 18 (0.33 kg O₂/ kg mata, < 149 μm, 70% O₂)

<dp> x, μm	f₃(x)	F₃(x)
5	0.00801	0
14.14214	0.0073	0.0801
27.20294	0.004247	0.1531
40.34848	0.003857	0.2253
48.29079	0.005256	0.2523
62.62587	0.009043	0.2996
88.1476	0.009403	0.4895
125.08	0.004957	0.781
176.8898	1.48E-05	0.9991
229.1288	0	1

Experimento No. 19 (0.25 kg O₂/ kg mata, < 149 μm, 100% O₂)

<dp> x, μm	f₃(x)	F₃(x)
5	0.00907	0
14.14214	0.00928	0.0907
27.20294	0.004659	0.1835
40.34848	0.003414	0.2627
48.29079	0.003856	0.2866
62.62587	0.005376	0.3213
88.1476	0.007984	0.4342
125.08	0.005243	0.6817
176.8898	0.001277	0.9124
229.1288	0.000243	0.9903

Experimento No.20 (0.33 Kg O₂/Kg mata,< 149 μm, 100% O₂)

<dp>	x, μm	f₃(x)	F₃(x)
	5	0.01216	0
	14.14214	0.01174	0.1216
	27.20294	0.0065	0.239
	40.34848	0.005614	0.3495
	48.29079	0.006289	0.3888
	62.62587	0.007952	0.4454
	88.1476	0.007016	0.6124
	125.08	0.00385	0.8299
	176.8898	1.15E-05	0.9993
	229.1288	0	1