

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA**



**“EVALUACION DE PARAMETROS FLUIDODINAMICOS Y DE LAS
CARACTERISTICAS BASICAS DE SECADO DEL MINERAL DE
HIERRO UTILIZADO EN EL PROCESO FINMET®”**

**Realizado por:
Br. Melissa Susana Castillejo Marín
C.I: 17.446.465**

Trabajo de Grado presentado ante la ilustre Universidad de Oriente como
Requisito Parcial para optar al Título de

INGENIERO QUÍMICO

Puerto La Cruz, marzo de 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA**



**“EVALUACION DE PARAMETROS FLUIDODINAMICOS Y DE LAS
CARACTERISTICAS BASICAS DE SECADO DEL MINERAL DE
HIERRO UTILIZADO EN EL PROCESO FINMET®”**

ASESORES

**Ing. Lucas Álvarez, Ph.D.
Asesor Académico**

**Ing. Roberto Valery, Esp.
Asesor Industrial**

Puerto La Cruz, marzo de 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA**



**EVALUACION DE PARAMETROS FLUIDODINAMICOS Y DE LAS
CARACTERISTICAS BASICAS DE SECADO DEL MINERAL DE
HIERRO UTILIZADO EN EL PROCESO FINMET®**

JURADOS

Ing. Lucas Álvarez, Ph.D.

Asesor Académico

Ing. Héctor Silva, M.Sc.
Jurado Principal

Ing. Yaneis Obando, M.Sc.
Jurado Principal

Puerto La Cruz, marzo de 2010.

RESOLUCION

De acuerdo con el Artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad De Oriente:

“Los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados con otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

AGRADECIMIENTOS

Es necesario empezar este párrafo con Dios, por darme la fuerza, la constancia, la luz que tanto te pido para seguir el camino que tienes preparado para mí, sabes que te llevo a todos lados.

A mis padres: Isol Marín y Max Castillejos por darme la vida, a ti mamá por ser el motivo para siempre levantarme, esta tesis es tuya, gracias por esa paz única que tú solo tienes, a ti papá por enseñarme el respeto hacia los demás, la honestidad y humildad.

A mis hermanos: Alejandro, simplemente mi mejor amigo, gracias por acompañarme en las noches eternas de redacción y escucharme cuando me sentí frustrada por los obstáculos del camino; a Valeria por ser el ejemplo fiel de la valentía, constancia y de que si se puede llegar a ser grande; por último pero no menos importante, Leonardo, me enseñaste a diseñar, como buen arquitecto que eres, los sueños para cumplirlos uno a uno.

A mi abuela que siempre me preguntaba como va la tesis hija, pues aquí la tienes.

A mi prima Vanessa Valery por su apoyo incondicional, estando lejos de casa supo como hacerme sentir parte de su ciudad.

A Jamel Rassi mi amiga de la infancia, aún estando lejos siempre estuvo pendiente de este trabajo y siempre tuvo fé en mí.

A mi novio, Roger, gracias por el amor, la paciencia y el apoyo que me diste para culminar este logro.

Al Dr. Lucas Álvarez, tutor académico, por su sabiduría y preocupación, por motivarme a entregarme mucho mas a este trabajo, su persona es de admirar, su calidad humana es única, mi respeto siempre. No me bastan estas líneas para agradecerle.

Al Ingeniero Miguelangel Narváez, sus conocimientos aportados fueron de gran valor para este trabajo además de contar con su bonita amistad.

Al Ingeniero Roberto Valery mi infinito agradecimiento por sus conocimientos aportados, sin su ayuda sencillamente no se hubiera podido realizar este trabajo, por su amistad y apoyo constante.

A los ingenieros Gonzalo Irigoyen y Patricia Yánes, por los conocimientos, por su amistad, los muchos almuerzos y la cura infalible de la risa mientras se pasaba la jornada de trabajo.

Al ingeniero Adersido Gómez por darme la oportunidad de formar parte de su excelente equipo de trabajo.

A mis amigos que siempre estuvieron allí es bonito contar con su amistad en esta vida: Georgina, Ani, Caliana, Simón, Dickson, Beatriz, Jorge, José D., José A., Frank, Doris, Silvia, Pedro y Stephanie y los que me faltan.

A la empresa Orinoco Iron por hacerme sentir parte de ellos, por el aprendizaje constante, la colaboración prestada y sobre todo por su gente, a los de investigación: Mariela, Nidia; a los de proceso: el gocho y el Sr. Wolfgang; los de corrosión: Wilmer, la Sra. Milagro; los de informática: Yaco y Jorge; los de servicios: el Sr. Villarroel.

Melissa Castillejo Marín

DEDICATORIA

Ante nada a Dios, siempre me ayudas a encontrar lo bueno por malo que sea el momento, converso contigo y las cosas toman sentido, a tí porque no puedo dormir si no me dibujo una cruz.

Este trabajo, cada letra, cada página, son mas tuyos que míos, eres un paradigma en mi vida, la fuerza que me levanta por muy oscuro que sea el día a ti mamá, de quien mas podría ser este trabajo, tu que día a día sigues y todavía sonríes, éste trabajo representa un logro mío y a la vez tuyo porque me ayudas a crecer, madurar y pensar que la vida no es fácil pero hay que vivirla de la mejor manera.

A mis hermanos, a los que están lejos y los que están cerca, mi familia nunca me abandona, han estado allí pase lo que pase, en las buenas y en las que no lo son tanto, por esos pequeños momentos inolvidables, llenos de sonrisas, porque a pesar de todo nos vemos y un abrazo basta, es necesario decirles que yo soy un poco de cada uno de ustedes.

Melissa Castillejo Marín

RESUMEN

Se presenta una evaluación de los parámetros fluidodinámicos y características del secado de mineral de hierro en lecho fluidizado en Orinoco Iron C.A., para: realizar la caracterización de los sólidos de alimentación al secador de mineral y del gas de fluidización; determinar el efecto de la granulometría de los sólidos de alimentación al secador sobre las características de secado; y elaborar balances másicos y energéticos en el secador de lecho fluidizado. Mediante la aplicación de métodos estandarizados de análisis físicos y químicos, y cálculos con modelos matemáticos pertinentes, los resultados revelaron que en los sólidos alimentados al secador industrial predominaron las partículas con diámetro promedio $618,5\mu\text{m}$ (26,57%). Se reportan las propiedades físicas del mineral (densidad a granel y aparente), porosidad, diámetros promedios de bases área y volumen, confirmando su heterogeneidad; con contenidos de 94,05% m/m de hematita (Fe_2O_3) y agua ligada (3,83%). También se presentan los resultados de densidad y viscosidad del gas de fluidización a condiciones medias de temperatura ($116\text{ }^\circ\text{C}$) y presión (0,98 atm). A la velocidad operacional del gas de fluidización, las partículas con $d_p > 1000\mu\text{m}$ ofrecen mayor resistencia al flujo por las fuerzas gravitacionales. Las partículas con $73,5 < d_p < 940\mu\text{m}$ resultan arrastradas por el gas de fluidización; pero las de tamaños $> 940\mu\text{m}$ permanecen *fluidizadas como arena*, según Geldart [6], en el secador, bajo régimen de fluidización en *transición a lecho turbulento*. El secado de los sólidos del mineral confirmó la presencia de tres períodos diferenciados: de velocidad de secado constante; y dos postcríticos (uno corto con mecanismo migratorio difusivo de la humedad interna a través de una delgada capa externa porosa; y otro más prolongado no lineal de mecanismo capilar y/o tortuoso) a velocidad de secado descendente. La velocidad de deshidratación de los sólidos durante velocidad de secado constante no cambió significativamente con la reducción de tamaños de partículas (3360-1000 μm). Los balances de masa y energía revelaron una humedad del gas a la salida de 15% aproximadamente, y un requerimiento energético de - 559,08 KJ/kg producto.h, a su humedad final (0,3922% b.h.).

INDICE GENERAL

RESOLUCION	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	viii
INDICE GENERAL	ix
INDICE DE FIGURAS Y FOTOS	xiv
INDICE DE TABLAS	xvii
INDICE DE TABLAS	xvii
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCION	1
1.1 DESCRIPCION GENERAL DE LA EMPRESA.....	1
1.1.1 Antecedentes de la empresa.	1
1.1.2 Descripción del proceso y de la planta Orinoco Iron.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.3 OBJETIVOS	7
1.3.1 Objetivo general:.....	7
1.3.2 Objetivos específicos:	7
CAPITULO 2	9
MARCO TEORICO	9
2.1 ANTECEDENTES.....	9
2.2 MATERIA PRIMA.....	10
2.3 SECADOR DEL TIPO LECHO FLUIDIZADO.....	11
2.4 CARACTERIZACION DE LAS PARTICULAS	12
2.4.1 Forma de las partículas	13
2.4.2 Porosidad del lecho	13
2.4.3 Densidad aparente	13
2.4.4 Diámetro promedio	14
2.5 FLUIDIZACION.....	15
2.5.1 Clasificación de las partículas.....	17
2.5.2 Tipos de régimen de fluidización.....	18

2.5.3 Velocidad mínima de fluidización	23
2.5.4 Velocidad terminal	26
2.6 ASPECTOS DE LA OPERACIÓN DE SECADO	28
2.6.1 Mecanismos y cinética de secado. Transferencia de calor y de masa..	28
2.6.2 Definiciones relacionadas a la operación de secado	29
2.6.3 Clasificación de la operación de secado	33
2.7 CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO	35
2.8 BALANZA DE DETERMINACION DE HUMEDAD (OHAUS).....	38
2.9 BALANCE DE MASA Y ENERGIA.....	39
2.9.1 Balance de masa.....	39
2.9.2 Balance de energía	39
2.9.3 Sistema y alrededores.....	40
2.9.4 Entalpía	40
2.9.5 Funciones de estado	40
2.9.6 Capacidad calorífica.....	40
2.9.7 Calor estándar de combustión	41
2.10 UTILIZACION DIRECTA DE PRODUCTOS DE COMBUSTION EN EL SECADO	41
2.10.1 Combustión	42
2.10.2 Combustión Completa.....	42
2.10.3 Combustión incompleta	42
2.10.4 Aire teórico	42
2.10.5 Exceso de aire	43
CAPITULO 3	44
DESARROLLO DEL TRABAJO	44
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR DE MINERAL: DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO, DENSIDAD A GRANEL, POROSIDAD, DENSIDAD APARENTE, COMPOSICIÓN QUÍMICA Y DIÁMETRO PROMEDIO DE LAS PARTÍCULAS (BASE ÁREA Y BASE VOLUMEN).	44
3.1.1 Distribución del tamaño de partícula	44

3.1.2 Densidad a granel.....	45
3.1.3 Porosidad.....	46
3.1.4 Densidad aparente.....	46
3.1.5 Composición química.....	46
3.1.6 Diámetro promedio de las partículas (base área y base volumen).....	46
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL GAS DE FLUIDIZACIÓN: DENSIDAD Y VISCOSIDAD A LA TEMPERATURA Y PRESIÓN DEL LECHO, VELOCIDAD SUPERFICIAL DE FLUIDIZACIÓN EN EL SECADOR DE MINERAL.....	48
3.2.1 Densidad del gas de fluidización.....	48
3.2.2 Viscosidad del gas de fluidización.....	49
3.2.3 Velocidad superficial del gas de fluidización.....	49
3.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS (VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN Y TERMINAL DE LAS PARTÍCULAS), Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL LECHO FLUIDIZADO (CLASIFICACIÓN DE PARTÍCULAS SEGÚN GELDART Y RÉGIMEN DE FLUIDIZACIÓN) EN EL SECADOR.....	50
3.3.1 Velocidad mínima de fluidización.....	50
3.3.2 Velocidad terminal de las partículas.....	51
3.3.3 Clasificación de partículas estándar según Geldart.....	51
3.3.4 Régimen de fluidización.....	51
3.4 DETERMINAR EL EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DE LOS SÓLIDOS DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR DE MINERAL SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS CINÉTICAS DE SECADO Y LAS CURVAS DE VELOCIDAD DE DESHIDRATACIÓN, EN FUNCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE HUMEDAD LIBRE EN LOS SÓLIDOS.....	52
3.4.1 Recolección de la muestra de mineral de hierro.....	52
3.4.2 Método de la estufa.....	53
3.4.3 Determinación de la pérdida de humedad mediante la balanza Ohaus.....	54
3.4.4 Construcción de las graficas de pérdida de humedad y de velocidad de secado.....	55

3.5 ELABORACIÓN DE BALANCES DE MASA Y DE ENERGÍA EN EL SECADOR DE MINERAL DE HIERRO MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO.	56
3.5.1 Balance de masa.....	56
3.5.2 Prueba para estimar el arrastre de ultrafinos.....	59
3.5.3 Balance de energía en la cámara de combustión.....	61
3.5.4 Hoja de cálculo.....	63
3.6 MUESTRA DE CÁLCULO	68
3.6.1 Cálculo de la distribución del tamaño, densidad a granel, porosidad, densidad aparente, composición química y diámetro promedio de las partículas (base área y base volumen).....	68
3.6.2 Cálculo de la densidad y viscosidad a la temperatura y presión del lecho.....	70
3.6.3 Cálculo de la velocidad superficial del gas de fluidización.....	71
3.6.4 Determinación de la velocidad mínima de fluidización y terminal de las partículas), y de las características del lecho fluidizado (clasificación de partículas según Geldart y régimen de fluidización).	71
3.6.5 Cálculos para realizar las curvas de velocidad de deshidratación, en función de los contenidos de humedad libre en los sólidos.	73
3.6.6 Elaboración de balances de masa en el secador de mineral de hierro mediante lecho fluidizado.	74
3.6.7 Balances de energía en la cámara de combustión.....	77
3.6.8 Balances de energía en el secador de lecho fluidizado.....	78
CAPITULO 4.....	81
DISCUSION Y RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR DE MINERAL: DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO, DENSIDAD A GRANEL, POROSIDAD, DENSIDAD APARENTE, COMPOSICIÓN QUÍMICA Y DIÁMETRO PROMEDIO DE LAS PARTÍCULAS (BASE ÁREA Y BASE VOLUMEN).	81

4.1.1 Distribución del tamaño	81
4.1.2 Densidad a granel, porosidad, densidad aparente, composición química y diámetro promedio de partículas (base área y base volumen)	83
4.2 Caracterización del gas de fluidización: densidad y viscosidad a la temperatura y presión del lecho, velocidad superficial de fluidización en el secador de mineral.....	86
4.3 Determinación de parámetros (velocidad mínima de fluidización y velocidad terminal de las partículas), y características del lecho fluidizado (clasificación de partículas según Geldart y régimen de fluidización) en el secador.	87
4.3.1 Velocidad mínima de fluidización	87
4.3.2 Velocidad terminal de las partículas	88
4.3.3 Clasificación según Geldart	90
4.3.4 Régimen de fluidización	91
4.4 Efecto de la granulometría de los sólidos de alimentación al secador de mineral sobre las características cinéticas de secado y las curvas de velocidad de deshidratación, en función de los contenidos de humedad libre en los sólidos.	92
4.5 Elaboración de balances de masa y de energía en el secador de mineral de hierro mediante lecho fluidizado.....	111
CONCLUSIONES	115
RECOMENDACIONES	118
BIBLIOGRAFIA	119
APENDICE A	¡Error! Marcador no definido.
APENDICE B	¡Error! Marcador no definido.
APENDICE C	¡Error! Marcador no definido.
APENDICE D	¡Error! Marcador no definido.
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	156

INDICE DE FIGURAS Y FOTOS

Figura 2.1: Diagrama del secador de lecho fluidizado presente en Orinoco Iron. [3].	12
Figura 2.2 Fases del lecho al incrementar la velocidad del gas (sistema gas-sólido) [5].	16
Figura 2.3 Representación de la clasificación de partículas según Geldart [6]. ...	19
Figura 2.4: Mapa de regimenes de fluidización.	23
Figura 2.5: Caída de presión en función de la velocidad del gas. [5]	24
Figura 2.6: Carta psicométrica [8].	31
Figura 2.7: Tipos de humedades [9].	33
Figura 2.8: Humedad libre en función del tiempo [11].	37
Figura 2.9: Velocidad de secado en función de la humedad libre [11].	38
Figura 2.10: Balanza Ohaus MB 200.	39
Figura 3.1: presentación de la hoja de cálculo.	64
Figura 3.2: ventana de instrucciones y observaciones.	65
Figura 3.3: ventana para ingresar datos.	66
Figura 3.4: Ventana de resultados del balance de masa.	67
Figura 3.5: Ventana de resultados del balance de energía.	67
Figura 4.1: Distribución de tamaño de partículas. (a) análisis diferencial;	84
Figura 4.2: Representación grafica de la velocidad minima de fluidización y de la velocidad superficial del gas, para diferentes diámetros promedios de partículas.	88
Figura 4.3: Representación grafica de la velocidad terminal de las partículas y de la velocidad superficial del gas de fluidización, para distintos diámetros promedios de partículas.	89
Figura 4.4: Representación gráfica, según Geldart, de como fluidizan las partículas [6].	90
Figura 4.5: Mapa de regimenes de fluidización según Grace [7].	91
Figura 4.6: Curvas de secado para la muestra original alimentada (a) pérdida de humedad vs. tiempo. (b) velocidad de secado vs. humedad libre.	93

Figura 4.7: Curvas de secado para la muestra del tamiz 6 <i>mesh</i> . (a) pérdida de humedad vs. tiempo. (b) velocidad de secado vs. humedad libre.	95
Figura 4.8: Curvas de secado para la muestra del tamiz 10 <i>mesh</i> . (a) pérdida de humedad vs. tiempo.(b) velocidad de secado vs. humedad libre.	97
Figura 4.9: Curvas de secado para la muestra del tamiz 16 <i>mesh</i> . (a) pérdida de humedad vs. tiempo. (b) velocidad de secado vs. humedad libre.	100
Figura 4.10: Curvas de secado para la muestra del tamiz -16 <i>mesh</i> . (a) pérdida de humedad vs. tiempo. (b) velocidad de secado vs. humedad libre.	102
Figura 4.11: Diagrama de resultados del balance de masa arrojados por la hoja de cálculo, que simula el comportamiento del secador de lecho fluidizado.	112
Figura 4.12: Diagrama representativo de los resultados del balance de energía arrojados por la hoja de calculo que simula el comportamiento del secador de lecho fluidizado presente en Orinoco Iron.	113
Figura A.1: Nomograma para conocer la viscosidad dependiendo de las coordenadas de la tabla anterior y de la temperatura. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura C.1: Regresión lineal para un conjunto de datos seccionados de la muestra original.	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.2: Regresión polinomial para un conjunto de datos seccionados de la muestra original.	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.3: Regresión lineal para un conjunto de datos seccionados de la muestra 6 <i>mesh</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.4: Regresión polinomial para un conjunto de datos seccionados de la muestra 6 <i>mesh</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.5: Regresión lineal para un conjunto de datos seccionados de la muestra 10 <i>mesh</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.6: Regresión polinomial para un conjunto de datos seccionados de la muestra 10 <i>mesh</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.7: Regresión lineal para un conjunto de datos seccionados de la muestra 16 <i>mesh</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura C.8: Regresión polinomial para un conjunto de datos seccionados de la muestra 16 <i>mesh</i>	¡Error! Marcador no definido.

- Figura C.9: Regresión lineal para un conjunto de datos seccionados de la muestra -16 *mesh*. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C.10: Regresión polinomial para un conjunto de datos seccionados de la muestra -16 *mesh*..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Foto D.1: Correa de alimentación de mineral de hierro a los secadores. **¡Error! Marcador no definido.**
- Foto D.2: Recolección de la muestra de mineral de hierro antes de alimentarlo a los secadores..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Foto D.3: Almacenamiento del mineral de hierro previo a su envío al laboratorio de física..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Foto D.4: Cuarteador para la homogenización de la muestra de mineral de hierro. **¡Error! Marcador no definido.**
- Foto D.6: Separación del mineral en diferentes tamices después del tamizado. **¡Error! Marcador no definido.**
- Foto D.7: Tamiz de 10 *mesh* utilizado para la separación de la mezcla de sólidos. **¡Error! Marcador no definido.**
- Foto D.8: Muestra de 6 *mesh* una vez secada en la balanza Ohaus. **¡Error! Marcador no definido.**

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Normas COVENIN para la determinación de la composición química.....	47
Tabla 4.1: Distribución de tamaños de partículas.....	82
Tabla 4.2: Resultados de densidad a granel y aparente, porosidad, diámetro promedio base área y base volumen, de los sólidos alimentados al secador.	85
Tabla 4.3: Composición química del mineral de hierro (base seca).	85
Tabla 4.5. Duración de los períodos de secado en función de la granulometría.	105
Tabla 4.6. Velocidades de secado constante y en el punto de inflexión a velocidad decreciente a diversas granulometrías.....	106
Tabla 4.7. Humedades libres críticas para los períodos.....	108
Tabla 4.8. Pérdidas de humedad para las diferentes granulometrías,	109
Tabla A.1. Equivalencias de unidades para la designación de los tamices y las diferentes dimensiones.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla A.2: Coordenadas de los gases para ser utilizadas en la figura siguiente y obtener la viscosidad.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla A.3: Ecuaciones de capacidad calorífica para compuestos orgánicos e inorgánicos a bajas presiones.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla A.4: Continuación ecuaciones de capacidad calorífica para compuestos orgánicos e inorgánicos a bajas presiones.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla A.5: Continuación ecuaciones de capacidad calorífica para compuestos orgánicos e inorgánicos a bajas presiones.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla A.6: Pesos moleculares de algunos compuestos presentes en el balance de masa y energía.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla A.7: Calores de combustión estándar de los posibles combustibles presentes en el gas natural, así como también los productos de combustión y algunos inertes.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla B.1: Datos de diámetros, cantidad de masa retenida y resultados de diámetros promedios para cada tamiz.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla B.2: Temperatura y presión en el lecho fluidizado.	¡Error! Marcador no definido.

Tabla B.3: Densidades y viscosidades para cada componente gaseoso presente en la mezcla..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.4: Valores resultantes del número adimensional de Arquímedes y de la velocidad mínima de fluidización a los diferentes diámetros promedios (tabla B.1)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.5: Valores de los parámetros adimensionales (dp^* y u_t^*) y la velocidad terminal a diferentes diámetros promedio (tabla B.1).**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.6: Composición porcentual del gas natural.**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.7: Kilomoles de oxígeno (O₂) requeridos, vapor de agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂) producidos..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.8: Kilogramos y fracción de cada compuesto y elemento presente en la mezcla gaseosa. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.9: Temperaturas a la entrada y salida para el mineral y la mezcla gaseosa, así como también la de referencia, en el lecho y la temperatura de ebullición normal. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.10: Entalpías de cada especie que participa en las reacciones de combustión de cada combustible presente en el gas natural.**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.11: Entalpías de reactantes, productos y la diferencia de productos menos reactantes, a diferentes unidades. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.12: Continuación de entalpías de reactantes, productos y la diferencia de productos menos reactantes, a diferentes unidades.**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.13: Resultados de las capacidades caloríficas del mineral a la entrada y salida del secador. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.14: Resultados de las capacidades caloríficas de la mezcla de gases a la entrada y salida del secador..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.15: Fracción en masa (peso) y fracción molar para las especies involucradas en la mezcla de gases..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.16: Capacidades caloríficas de cada componente de la mezcla de gases, así como el promedio para el gas seco y el vapor de agua.**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla B.17: Entalpías para el sólido de alimentación, el que se descarga y los ultrafinos arrastrados, así como también la mezcla de gases para la entrada y salida del secador. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C.1: Resultados del secado total de las muestras por el método de la estufa y el sólido totalmente seco por gravimetría en la balanza Ohaus. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C.2: Datos experimentales para las curvas de secado (pérdida de humedad vs. tiempo, y velocidad de secado vs. humedad libre) para la muestra original. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C.3: Datos experimentales para las curvas de secado (pérdida de humedad vs. tiempo, y velocidad de secado vs. humedad libre) para la muestra de 6 *mesh*. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C.4: Continuación de datos experimentales para las curvas de secado (pérdida de humedad vs. tiempo, y velocidad de secado vs. humedad libre) para la muestra de 6 *mesh*. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C.5: Datos experimentales para las curvas de secado (pérdida de humedad vs. tiempo, y velocidad de secado vs. humedad libre) para la muestra de 10 *mesh*. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C.6: Continuación de datos experimentales para las curvas de secado (pérdida de humedad vs. tiempo, y velocidad de secado vs. humedad libre) para la muestra de 10 *mesh*. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C.7: Datos experimentales para las curvas de secado (pérdida de humedad vs. tiempo, y velocidad de secado vs. humedad libre) para la muestra de 16 *mesh*. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla C.8: Datos experimentales para las curvas de secado (pérdida de humedad vs. tiempo, y velocidad de secado vs. humedad libre) para la muestra de -16 *mesh*. **¡Error! Marcador no definido.**

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 DESCRIPCION GENERAL DE LA EMPRESA

1.1.1 Antecedentes de la empresa.

La tecnología de Orinoco Iron fue desarrollada originalmente por FIOR de Venezuela.S.A., fundada el 3 de agosto de 1973. En 1976, el proceso de reducción directa FIOR inició sus operaciones con una capacidad de 400.000 toneladas de briquetas anuales. Este proceso fue pionero en el mundo en el procesamiento de finos de mineral de hierro en lecho fluidizado para producir briquetas en caliente, y ha sido sustituido por la tecnología FINMET [1].

Considerando la experiencia acumulada a través de los años y las modificaciones realizadas al proceso original, en 1987 se decidió llevar al papel todo ese cúmulo de conocimientos y modificaciones y se introdujo ante la Oficina de Patentes de los Estados Unidos la solicitud de patente para el proceso FIOR mejorado, así como tres solicitudes relacionadas que fueron otorgadas en 1991.

En noviembre de 1992 se firmó un contrato de cooperación tecnológica entre Orinoco Iron y la compañía Austriaca Voest Industrieanlagenbau (VAI), compañía ésta con amplia trayectoria en el desarrollo de procesos y diseño de plantas industriales, para el desarrollo de un nuevo proceso basado en lecho fluidizado gas-sólido, que permitiera el aprovechamiento de la abundancia de finos de mineral de hierro en Venezuela y el resto del mundo, y cuyos consumos energéticos de materia prima y costos de producción se situasen en los más altos niveles competitivos frente a otros procesos de reducción directa [1].

El proceso FINMET incorporó las mejoras realizadas al proceso FIOR. El uso de tecnologías y equipos modernos han hecho posible la disminución de consumos energéticos y el cumplimiento de las regulaciones en materia ambiental. Adicionalmente, ha permitido el uso de finos de mineral de hierro con un mínimo de preparación.

1.1.2 Descripción del proceso y de la planta Orinoco Iron

Orinoco Iron es una empresa siderúrgica venezolana que básicamente procesa mineral para convertirlo en briquetas con un alto contenido metálico, mediante la tecnología FINMET (Finos Metalizados), la cual involucra un proceso de reducción directa que introduce mejoras al proceso FIOR, y que debe su nombre a sus iniciales en inglés “Fluidized Iron Ore Reduction” (Reducción del mineral de hierro en lecho fluidizado).

El proceso FINMET se basa en la tecnología de lechos fluidizados, el cual usa un gas para la reducción, rico en H_2 y CO . En el mencionado proceso se elimina el oxígeno del mineral de hierro sólido en cuatro etapas de reducción. La materia prima utilizada son finos de mineral de hierro suministrados por Ferrominera Orinoco.

La planta de Orinoco Iron comprende dos módulos. Cada uno de éstos contiene dos trenes y en cada tren existe una batería de reactores en serie.

La planta se divide en cinco áreas principales, las cuales son:

1.1.1.1 Área de mineral y producto.

1.1.1.2 Área de reactores.

1.1.1.3 Área de servicios.

1.1.1.4 Área de planta de gas.

1.1.1.5 Área de briqueteado.

1.1.1.1 Área de mineral y producto

Es la parte de la planta que se encarga de recibir el mineral de hierro y procesarlos para luego alimentarlos al área de reactores. Es una de las áreas más importantes, ya que dependiendo de la calidad del mineral alimentado, el proceso puede ser o no más eficiente.

El mineral se recibe y se almacena en pilas; luego es llevado a la criba para separar las partículas de mineral mayor o igual 5/8". Posteriormente es alimentado a los dos secadores de lecho fluidizado en contracorriente, con una mezcla de gases calientes. El mineral una vez secado se almacena en silos. Por otra parte los gases de fluidización son llevados a un sistema de lavado de gases para la recuperación de los ultrafinos arrastrados. Una vez culminada la preparación del mineral, es transportado a los silos en el sistema de reactores para ser reducidos. Posteriormente, el área de preparación de producto recibe las briquetas y las almacenan para su posterior despacho.

1.1.1.2 Área de reactores

Esta área está compuesta por una batería de reactores arreglados en serie a altas temperaturas, de arriba hacia abajo en contracorriente con el gas reductor. El mineral preparado es alimentado desde arriba y fluye por gravedad. A medida que desciende sufre una reducción continua donde se elimina el oxígeno presente en el mineral de hierro. Este mineral se mantiene fluidizado por el gas reductor rico en H_2 y CO .

En el área de reactores, el mineral una vez secado es sometido a calentamiento, y los óxidos de hierro presentes son reducidos hasta obtener hierro metálico (Fe^0). Los reactores son numerados del 10 al 40 de manera decreciente. En el reactor R-40 se elimina la mayor parte del agua por cristalización y se reduce a hematita (Fe_2O_3). Así mismo, en el R-30 la hematita se reduce a magnetita (Fe_3O_4). Y posteriormente, en el R-20 la magnetita se reduce a wustita (FeO) la cual finalmente es reducida a hierro metálico.

1.1.1.3 Área de servicios

Comprende la parte de la planta que se encarga de suministrar los servicios tales como:

- Aire de servicio e instrumentación.

Es suministrado por medio de tres compresores eléctricos, los cuales permiten lograr las condiciones de presión del aire requerido en toda la planta.

- Generación de gas inerte.

El gas inerte es generado por la combustión del gas natural con aire; el gas resultante es enfriado por pulverización (*spray*) de agua de enfriamiento. Posteriormente, el gas es llevado a los compresores y pasa a los secadores que operan suministrando gas inerte, a las condiciones de presión de 18,3 bar y temperatura de 6°C para el uso requerido en la planta.

- Sistema de tratamiento de agua.

El agua que se emplea en la empresa es suministrada por la Corporación Venezolana de Guayana (C.V.G), directamente, sin previo tratamiento por lo que se hace necesario aplicarle un proceso de filtración con arena y carbón. Para evitar la corrosión se le añade polímeros sintéticos y se le remueve la dureza en intercambiadores catiónicos.

- Agua de enfriamiento y purificación.

Para enfriar el agua, el área de servicios cuenta con una torre de enfriamiento y bombas de agua. Para la purificación del agua que retorna a esta área, después de haber sido utilizada en la planta, esta agua es llevada a dos pozos de sedimentación para eliminarle las partículas finas de mineral de hierro.

1.1.1.4 Área de planta de gas

Para la reducción directa es necesaria la preparación del gas reductor, el cual es una mezcla de los gases de hidrógeno/monóxido de carbono.

La planta consta de dos módulos en paralelo para la producción del gas reformado, el cual requiere algunos procesos previos para su obtención (Hidrogenación, Desulfuración, Reformación y Conversión de CO).

El gas natural que consume la planta es utilizado como combustible en los hornos de reformación, recalentamiento, generación de gas inerte, formación de carbono en el producto; para el proceso de reformación donde se obtiene el gas reformado y para el secado de mineral en los secadores de lecho fluidizado.

El gas que sale del reactor R-40 es reciclado, enfriado y limpiado. Para esto el gas pasa por un enfriador/lavador en donde entra en contacto directo con agua. El gas limpio es comprimido y se le remueve el CO₂ que contiene. Para esto es necesario que pase a través de una columna de lavado con una solución de carbonato de potasio. La tecnología para la remoción de CO₂ es conocida como proceso Benfield [1]. Luego de este proceso de purificación, el gas se calienta en el horno recalentador de gas reductor hasta la temperatura requerida para la reacción de reducción (840-850 °C).

1.1.1.5 Área de briqueteado

El material ya reducido a hierro metálico en el reactor R-10 es transportado al área de briqueteado, para ser compactado en caliente por efecto de la presión hidráulica de las prensas rotatorias. El material no compactado es reciclado nuevamente a la briqueteadora. Las briquetas, como producto final, son enfriadas por un sistema de aire, como también pasivadas para evitar la reoxidación. Finalmente las briquetas se almacenan en pilas o son llevadas a los silos de carga del tren, para llevarlas al puerto.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La planta Orinoco Iron ubicada en la zona industrial de Matanzas, en Puerto Ordaz; estado Bolívar, se encarga de la producción y comercialización de briquetas de hierro a través de un proceso de reducción directa, único en el mundo, denominado FINMET® (finos metalizados). El proceso FINMET utiliza gas reformado rico en hidrógeno a temperatura y presión elevadas, para remover el oxígeno del mineral de hierro en una batería de reactores de lecho fluidizado. Finalmente el mineral de hierro es compactado en forma de briquetas con alto porcentaje de metalización (92%). La planta cuenta con dos módulos, cada uno de los cuales está formado por dos trenes de producción de briquetas.

Para lograr la reducción del mineral de hierro en los reactores de lecho fluidizado, de forma eficiente y con las especificaciones de calidad requerida, es necesario realizar un tratamiento preliminar a la materia prima en un área denominada “Mineral y Producto”, donde se elimina la humedad del mineral de hierro por medio de un secador de lecho fluidizado para evitar obstrucciones en los equipos y sistemas aguas abajo, así como para evitar la disminución del poder reductor del gas en el circuito de reactores de reducción. En esta área también se ajusta la distribución de tamaño de partículas por medio de un sistema de cribado y molienda para lograr una eficiente fluidización y reducción de partículas en los reactores de reducción.

En la planta se tienen dos secadores de lechos fluidizados que distribuyen el mineral seco a los dos módulos de producción. Estos equipos son críticos en la cadena productiva, y en muchas ocasiones se convierten en las principales limitantes para la producción de briquetas de hierro metálico. Las fallas operativas en los secadores de mineral llevan a operar la planta a baja capacidad y en algunos casos a realizar paradas no previstas de un tren de producción. La continuidad operativa de los secadores de mineral se interrumpe, en la mayoría de los casos, por fallas de la parrilla distribuidora de gas, que es un equipo interno del secador

que se utiliza para distribuir uniformemente el gas de fluidización a lo largo del lecho del secador. Se han detectado diversas causas de las fallas de la parrilla distribuidora de gas, como son: prácticas operativas ineficientes, procedimientos de reparación no adecuados, falta de capacitación al personal operativo en los procedimientos de arranque y parada, metalurgia inadecuada de algunos dispositivos del equipo, alimentación de mineral de hierro con granulometría fuera de especificación, filosofía de control no adecuada, entre otros.

Uno de los problemas de operación del secador de mineral es el manejo de temperaturas muy elevadas debajo de la parrilla distribuidora de gas, para poder lograr el porcentaje de humedad requerido en el área de reactores. Esto deteriora en gran medida al equipo y obliga su parada para realizar reparaciones. Se han propuesto diversos cambios de diseño en el equipo para eliminar este problema, y para poder realizar la toma de decisiones con el menor riesgo posible. Es necesario entonces realizar un estudio global del equipo donde se evalué la operación de secado (balances de masa y energía, análisis de las curvas de secado), y la fluidodinámica del lecho de partículas (distribución de tamaños de partículas, régimen de fluidización y velocidad mínima de fluidización), lo cual constituye el objetivo del presente estudio.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general:

Evaluar los parámetros fluidodinámicos y características básicas del secado de mineral de hierro utilizado en el proceso FINMET®.

1.3.2 Objetivos específicos:

1. Realizar la caracterización de los sólidos de alimentación al secador de mineral: distribución del tamaño, densidad a granel, porosidad, densidad aparente, composición química y diámetro promedio de las partículas (base área y base volumen).

2. Realizar caracterización del gas de fluidización: densidad y viscosidad a la temperatura y presión del lecho, velocidad superficial de fluidización en el secador de mineral.
3. Determinar los parámetros (velocidad mínima de fluidización y velocidad terminal de las partículas), y las características del lecho fluidizado (clasificación de partículas según Geldart y régimen de fluidización) en el secador.
4. Determinar el efecto de la granulometría de los sólidos de alimentación al secador de mineral sobre las características cinéticas de secado y las curvas de velocidad de deshidratación, en función de los contenidos de humedad libre en los sólidos.
5. Elaborar balances de masa y de energía en el secador de mineral de hierro mediante lecho fluidizado.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES

Molina, K. (2005) [2] realizó un balance de masa y energía en un secador de lecho fluidizado para el secado de mineral de hierro, tomando en cuenta solo el flujo de la mezcla de gases producto de la combustión ocurrida antes de la entrada del mineral, para retirar el excedente de agua con la mezcla de gases calientes. Tomó en cuenta las reacciones posibles que se pueden dar entre el gas natural y el aire, conoció la cantidad y composición del gas de salida, la cantidad mínima requerida para poder quemar el gas natural, así como también la temperatura de llama adiabática.

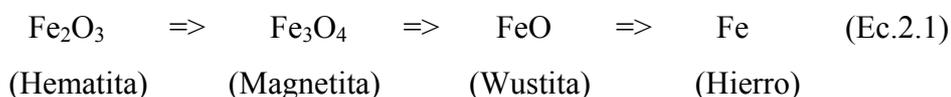
El equipo natural de trabajo (ENT) del área de Mineral y Producto [3] investigaron acerca de los problemas más importantes que afectan el secado del mineral de hierro, y los daños que producen las altas temperaturas en el secador de lecho fluidizado. Concluyeron que para garantizar un secado eficiente del mineral las temperaturas bajo parrilla deben ser altas, pero estas elevadas temperaturas ocasionan deformaciones al equipo inclusive pueden llegar a romperse las toberas y ferrules, y fragmentar la capa aislante. Ante esta problemática el (ENT) de mineral y producto, diseñó planes a corto, mediano y largo plazo para dar posibles respuestas a los problemas presentes.

Ramos E. (2007) [4] llevó a cabo un trabajo centrado en el adiestramiento de personal en el área de mineral y producto en la empresa Orinoco Iron, para el suministro continuo de mineral de hierro seco, con las especificaciones mínimas requeridas para ser reducido en la batería de reactores.

2.2 MATERIA PRIMA

El hierro existe en la corteza terrestre en muchos minerales diferentes, como la hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) y óxido de hierro (FeO), entre otros. La hematita puede llegar a tener un 72% de contenido de hierro metálico, por lo que es el más rico de los minerales y su hierro muy puro, mientras que la magnetita es un poco más pobre.

Existe un gran número de estados de los óxidos de hierro; los más típicos se enuncian a continuación:



Hematita (Fe_2O_3): contiene 30% de oxígeno en peso. Presenta un color rojizo, además tiene la característica de que mancha la piel al tocarla. Existen dos tipos de cristales de hematita, el tipo más común en mineral de hierro es hexagonal, mientras que el romboédrico es generalmente considerado inestable y es ciertamente formado solamente bajo condiciones muy específicas. A continuación se muestran algunas características:

Magnetita (Fe_3O_4): la magnetita es un imán natural y forma parte de un grupo de minerales llamados óxidos. Usualmente la magnetita puede ser identificada a causa de su notorio magnetismo y por su color oscuro. Junto con la hematita es una de las menas más importantes, al contener un 72% de hierro (es el mineral con más contenido en hierro).

Wustita (Fe_{1-y}O): el óxido ferroso se conoce como wustita (FeO), y es probablemente el sólido no estequiométrico más ampliamente estudiado. La wustita es metaestable a temperatura ambiente, por lo que se forma a temperaturas altas y después se enfría rápidamente.

2.3 SECADOR DEL TIPO LECHO FLUIDIZADO

En este tipo de secador las partículas que se están secando se separan parcialmente de manera que fluyan unas sobre otras. El movimiento descendente del material se produce por gravedad, mientras que el ascendente es por agitación mecánica. Su gran ventaja es que la separación resultante de las partículas y la exposición continua de nuevas superficies del material permiten un calentamiento más rápido al igual que una muy buena transferencia de masa.

El lecho fluidizado se caracteriza porque las partículas sólidas se suspenden parcialmente en la corriente de aire caliente hacia arriba; las partículas se elevan y luego caen al azar de manera que la mezcla sólido-gas actúa análogamente como un líquido en ebullición, como lo muestra la figura 2.1. Aquí el contacto sólido-gas es excelente y resulta en un mejor calentamiento y transferencia de masa que los secadores de lecho estático y móvil.

El aire en su recorrido suspende el material sólido y se mezcla con él, formando el fluidizado que adopta la forma del recipiente que los contiene. Las partículas sólidas se arremolinan y caen al fondo, posteriormente vuelven a elevarse y a caer; este ciclo se repite cientos de veces. Los secadores de lecho fluidizado son muy eficientes, porque cada partícula es rodeada por una columna de aire caliente, produciendo uniformidad de la temperatura, composición y distribución del tamaño de partículas. La única condición es que el material a secar no esté muy húmedo, porque puede hacer que se pegue aún más, ni tampoco ser demasiado friable, porque generaría muchas partículas finas. Estos secadores son muy rápidos.

En el caso de Orinoco Iron el gas caliente está constituido por gases de combustión, el cual se introduce al secador por medio de una parrilla provista de toberas en toda su superficie para el flujo del gas. Esta mezcla de gases se

introduce al secador y fluidiza el lecho de finos de mineral de hierro; la velocidad tiene que ser tal que los sólidos floten sin salir del sistema.

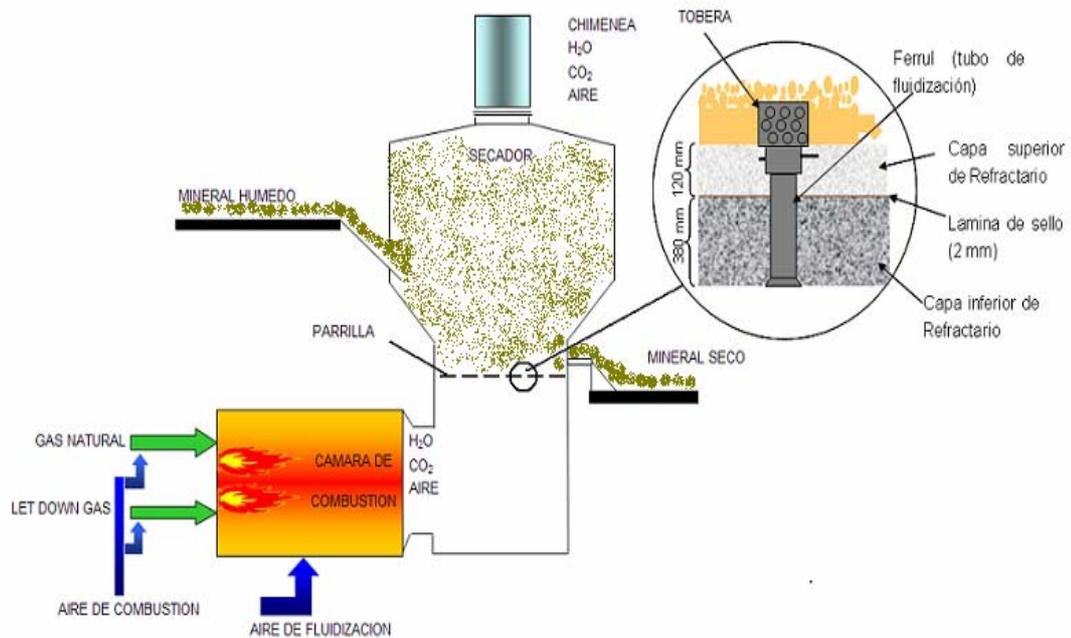


Figura 2.1: Diagrama del secador de lecho fluidizado presente en la planta [3].

Los secadores presentes en la planta son del tipo lecho fluidizado, equipados ambos por una parrilla refractaria para la distribución del gas, con extremos cóncavos, dotadas de 223 toberas de forma cilíndrica, cada una con 30 orificios para una distribución homogénea del gas, el diámetro de la parrilla es de 3920 mm. Este equipo cuenta también con dos ventiladores en serie para el aire de fluidización, un ventilador para el aire de combustión y un sistema de purificación para el aire cargado de ultrafinos. Los secadores tienen una capacidad de alimentación de 495 t/h.

2.4 CARACTERIZACION DE LAS PARTICULAS

En un proceso de fluidización es de suma importancia conocer detalladamente las características físico-químicas de las partículas que se utilizan.

Directa o indirectamente las características y propiedades de las partículas afectan el comportamiento del lecho fluidizado y el secado de los sólidos.

Para determinar el régimen del proceso de fluidización, se debe estudiar muy detalladamente las principales características de las partículas sólidas que forman el lecho. Entre las que destacan: diámetro de la partícula, forma de las partículas, porosidad y densidad aparente.

2.4.1 Forma de las partículas

La forma de una partícula individual se puede expresar convenientemente en términos de la esfericidad (Φ), que es independiente del tamaño de la partícula. El parámetro de la esfericidad se utiliza debido a que las partículas en los lechos suelen ser irregulares, así que al conocer su esfericidad se puede saber qué tan esféricas son o en cuanto difieren de una esfera regular.

2.4.2 Porosidad del lecho

La porosidad del lecho (ϵ) se refiere a los espacios vacíos existentes dentro del mismo y está afectada por ciertos factores. Aquellos aspectos que tienen mayor influencia sobre la porosidad del lecho son: el tamaño, la forma y la rugosidad de las partículas, así como la relación existente entre el diámetro de la partícula y el diámetro del lecho.

2.4.3 Densidad aparente

La densidad aparente se define como la masa contenida en la unidad de volumen que ocupa la muestra. La densidad aparente incluye el espacio poroso y el material sólido. A menor densidad aparente, mayor espacio poroso; es decir, el material es menos compacto.

2.4.4 Diámetro promedio

Debido a que generalmente no se trabaja con partículas con geometría regulares, se debe realizar los cálculos correspondientes para determinar sus dimensiones aproximadas por medio de un muestreo.

El diámetro de partículas (d_p), sería el tamaño único de partículas que tendría la misma área superficial total que la mezcla de tamaños en cuestión; análogamente sucede para el volumen total del lecho e igual fracción de poros en ambos casos. Esta definición conduce a la siguiente expresión:

$$dp_A = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\overline{dp}_i} \right)} \quad (\text{Ec.2.2})$$

Donde:

dp_A : diámetro promedio base área (μm).

x_i : fracción másica retenida en cada tamiz.

\overline{dp}_i : diámetro promedio de abertura de tamiz entre dos tamices consecutivos (μm).

n : número total cociente de la fracción másica y el diámetro promedio de abertura de tamiz entre dos tamices consecutivos.

i : identificación del cociente de la fracción másica y el diámetro promedio de abertura de tamiz entre dos tamices consecutivos entre los tamices superior (i) e inferior ($i+1$).

La ecuación 2.2 da como resultado el diámetro promedio de partículas base área de las partículas. La escogencia de este tipo de diámetro promedio de partículas radica en la forma en que las partículas fluidizan en el lecho, donde la fuerza friccional del gas sobre el área externa inferior de las partículas iguala o supera al peso de las mismas para mantenerlas suspendidas.

Para un lecho de partículas no esféricas, la ecuación 2.2 se replantea utilizando un diámetro de partícula equivalente [5], definido como:

$$d_e = \phi \cdot d_{p_A} \quad (\text{Ec.2.3})$$

Donde:

d_{p_A} : diámetro promedio base área (μm).

2.5 FLUIDIZACION

La fluidización es un proceso por el cual una corriente ascendente de fluido (líquido, gas o ambos) se utiliza para suspender partículas sólidas.

Cuando un fluido circula a través de un lecho de partículas, si su velocidad de circulación es baja, el lecho permanece estático y la caída de presión es igual al peso aparente de las partículas por unidad de área de la sección transversal. Esta caída de presión se calcula por la ecuación de Ergun, (ecuación 2.4)

$$\frac{\Delta P}{h} = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot u}{d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot u^2}{d_p} \quad (\text{Ec.2.4})$$

Siendo:

ΔP : caída de presión (Pa).

h: altura del lecho (m).

μ : viscosidad (kg/m.s).

u: velocidad superficial del gas (m/s).

ρ_g : densidad del gas (kg/m^3).

d_p : diámetro promedio (μm).

Pero si la velocidad del fluido aumenta, las partículas sufren un reordenamiento para ofrecer una menor resistencia al desplazamiento del fluido y el lecho empieza a expandirse con el consiguiente aumento de la porosidad del

lecho. Entonces, la caída de presión a través del lecho equilibra la fuerza de gravedad sobre los sólidos, descontando el empuje, se tiene:

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_g - \rho) \cdot g \quad (\text{Ec.2.5})$$

Donde:

L: es la altura del lecho (m).

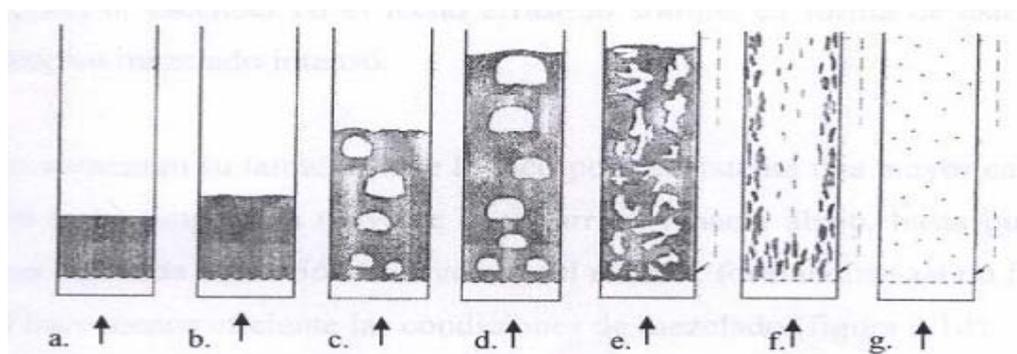
ε : la porosidad para el lecho expandido a condiciones de fluidización mínima (adimensional).

ρ_g : densidad del gas (kg/m^3).

ρ : densidad del lecho (kg/m^3).

g: gravedad (m/s^2).

Cuando el lecho se mantiene suspendido, existen diferentes tipos de fluidización, como lo muestra la figura 2.2, la cual presenta los diferentes comportamientos del lecho, dependiendo de la velocidad del gas.



(a) Lecho fijo. (b) Condiciones de mínima fluidización. (c) Régimen burbujeante.

(d) Régimen de flujo en intervalos. (e) Fluidización turbulenta. (f) Rápida fluidización.

(g) Transporte neumático.

Figura 2.2 Fases del lecho al incrementar la velocidad del gas (sistema gas-sólido)

[5].

La figura 2.2a corresponde a un lecho fijo o estático. Al incrementar la velocidad del gas, llega hasta una velocidad conocida como velocidad mínima de fluidización (u_{mf}), donde el lecho se expande uniformemente debido a que las partículas empiezan a chocar unas con otras, moviéndose de manera muy agitada, creando excelentes condiciones de mezclado, como lo muestra la figura 2.2b. Al continuar incrementando la velocidad del gas, el lecho deja de poseer características de régimen homogéneo, las partículas sólidas giran dentro del lecho con más rapidez, produciéndose grandes inestabilidades y el gas, en su intento por atravesar el lecho forma burbujas, figura 2.2c. Si se aumenta aun más la velocidad del gas, las burbujas continúan creciendo y ocupan cada vez más espacio en el lecho, provocando que las partículas sean empujadas hacia abajo por las paredes; incluso puede darse el caso en que la burbuja crezca tanto que alcance las paredes (figura 2.2d).

Posteriormente la turbulencia en el sistema se incrementa; los espacios vacíos entre las partículas aparecen y desaparecen, la superficie del lecho fluctúa y no puede observarse claramente definida (figura 2.2e). Si se continua aumentando aun más la velocidad superficial del gas, u_o , el régimen se vuelve turbulento y los sólidos ascienden por el centro del secador y caen por las paredes del mismo (figura 2.2f). Finalmente en la figura 2.2g se muestra un régimen de flujo donde las partículas son arrastradas fuera del lecho; por efecto de una velocidad mucho mayor a la velocidad terminal.

2.5.1 Clasificación de las partículas

Se ha determinado que las partículas no son totalmente esféricas, pero además, a partir de experimentos con lechos fluidizados, se ha descubierto que no todos los materiales fluidizan de la misma manera. A consecuencia de esto Geldart [6] propuso cuatro clases de comportamientos de partículas, basado en la diferencia entre las densidades de las partículas y las del medio de fluidización (ρ -

ρ_g), y el tamaño promedio de las partículas (d_{pA}). Estos cuatro grupos son los siguientes (figura 2.3):

Grupo A: aireables. Partículas que tienen un diámetro promedio pequeño y/o densidad baja ($< 1,4 \text{ g/cm}^3$). Estos sólidos son fácilmente fluidizables, con fluidización suave a bajas velocidades y burbujeo controlado con pequeñas burbujas a altas velocidades.

Grupo B: parecido a la arena. La mayoría de las partículas tienen un tamaño $40\mu\text{m} < d_p < 500\mu\text{m}$ y densidad aparente $1,4 < \rho < 4 \text{ g/cm}^3$. Estos sólidos fluidizan muy bien con acción burbujeante vigorosa y burbujas grandes. Las burbujas crecen de manera continua, sin existir un límite en cuanto al tamaño máximo alcanzado.

Grupo C: cohesivas. Partículas muy finas, cuya fluidización es muy difícil de alcanzar debido a que las fuerzas interpartículas son mayores que las fuerzas ejercidas por el gas. Estas partículas no son capaces de alcanzar la separación necesaria para ser totalmente soportadas. Ejemplo de estas partículas son: polvo facial, harina, almidón.

Grupo D: partículas muy grandes y/o muy densas. En lechos muy profundos son difíciles de fluidizar. Se comportan erráticamente, con grandes explosiones de burbujas o acanalamientos severos. El secado de granos y guisantes y la gasificación de carbón, son algunos ejemplos.

2.5.2 Tipos de régimen de fluidización

Una vez que el lecho fluidiza, existe una variedad de diferentes regímenes de flujos, dependiendo del tamaño de partículas y densidad, presión y temperatura del gas, velocidad de fluidización, entre otros. Muchos investigadores estudiaron los diferentes regímenes y realizaron mapas de flujo de experimentos con varios lechos fluidizados [7].

a. Fluidización turbulenta y agitada

Lechos de partículas pequeñas. Para un lecho de partículas pequeñas, al incrementarse la velocidad del gas, la acción burbujeante se hace intensamente vigorosa, y es acompañada por fluctuaciones de presión cada vez mayores, medidas justo encima del distribuidor del gas. Tales fluctuaciones llegan a alcanzar un pico y luego disminuyen abruptamente hasta estabilizarse. Esta progresión corresponde a la transición desde la fluidización burbujeante hasta la turbulenta. Esta transición ha sido caracterizada por Yerushami y Canpurt [7] tomando en cuenta la velocidad V_c , a la cual ocurre el máximo valor de las fluctuaciones de presión, y la velocidad V_k , donde estas fluctuaciones comienzan a estabilizarse. Esta velocidad V_k ha sido denominada la velocidad de inicio de la fluidización turbulenta, la cual comienza a ocurrir a velocidades de gas muy superiores a U_t (velocidad terminal de las partículas), para el tamaño medio de los sólidos del lecho. Típicamente la relación V_k/U_t disminuye con el incremento de la presión.

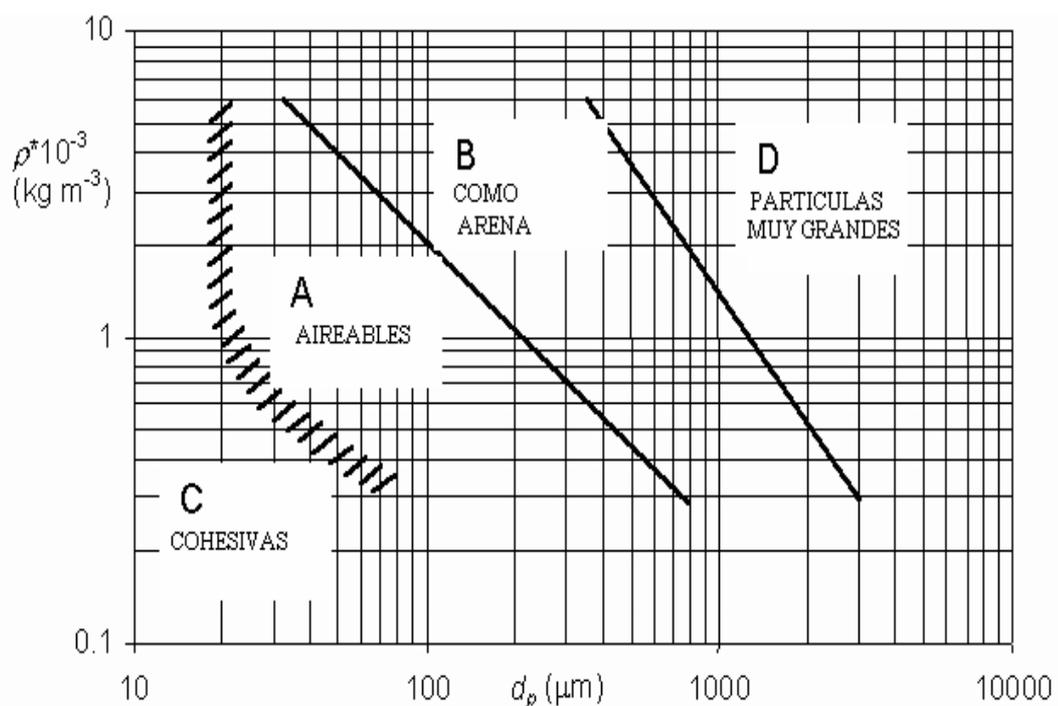


Figura 2.3 Representación de la clasificación de partículas según Geldart [6].

En el régimen de fluidización turbulenta, las burbujas ya no parecen distinguirse entre sí. Se pueden observar racimos y bandas de partículas, como también espacios vacíos de formas alargadas y distorsionadas, que se mueven violentamente haciendo difícil diferenciar entre las fases continua y discontinua en el lecho.

Por otra parte, el espacio vacío del lecho es grande, y en la superficie no distinguible del lecho, los racimos y bandas de partículas son arrojadas continuamente hacia la zona diluida. Estos racimos se dispersan en partículas simples, y las más pequeñas son expulsadas del lecho. Por consiguiente, se necesitan ciclones y otros dispositivos para mantener el inventario de partículas del lecho. No obstante la densidad superficial del flujo másico de estas partículas finas que deben ser atrapadas y retornadas al lecho no es excesiva.

b. Lechos de partículas grandes.

De acuerdo a observaciones visuales, los lechos de partículas grandes se comportan de manera muy diferente que los de partículas finas. Primeramente, al aproximarse a la velocidad V_c de máxima fluctuación de presión, se pueden generar burbujas explosivas muy grandes, especialmente en sólidos tipo D, según Geldart. En estos lechos fluidizados de partículas grandes, la transición al flujo turbulento ocurre a menores velocidades relativas V_k/U_t y aun más bajas que la velocidad terminal (U_t).

A diferencia de los pequeños racimos y bandas de material que se mueven violentamente por todo el lecho en los sistemas de partículas finas, en el caso de lechos de partículas gruesas, se observa movimiento uniforme a gran escala, circulación bruta del material del lecho y acanalamiento severo. Este régimen de fluidización de partículas grandes es denominado fluidización agitada, para distinguirlo del término más general FLUIDIZACION TURBULENTA, el cual se aplica principalmente para los sistemas de partículas finas.

c. Transporte neumático de sólidos

Al considerar el flujo ascendente de aire conjuntamente con la alimentación continúa de sólidos finos a un tubo vertical, si la velocidad del aire es suficientemente elevada y la tasa de alimentación de los sólidos es muy pequeña, entonces todos los sólidos serán arrastrados por la corriente de aire hacia la sección superior del tubo, en forma de partículas ampliamente separadas y dispersas en el gas.

En este tipo de régimen de flujo la velocidad relativa del gas respecto a la del sólido, $U_p = U_o - U_s$, es conocida como la velocidad de deslizamiento. Hasta un cierto punto, se puede modificar los flujos de gas y sólidos, y mantener aun una mezcla ascendente sólido-gas limpia y dispersa. Esto es lo que se conoce como un régimen de transporte neumático.

El desplazamiento neumático convencional en este régimen opera usando altas velocidades de gas, de unas 20 veces la velocidad terminal de las partículas. Cuando se trata de partículas finas, con el fin de prevenir la sedimentación de las partículas sobre las superficies horizontales del sistema de flujo. Usualmente la relación de flujos máxicos de sólidos a gas es de 1:20, lo cual equivale a una fracción muy elevada de espacios vacíos, y donde casi no ocurren interacciones entre las partículas.

d. Fluidización rápida

Por su parte un lecho de sólidos en gas bajo régimen de fluidización rápida se caracteriza por tener: la concentración de sólidos se ubica entre las condiciones de lechos de fase densa y las de transporte neumático; racimos y bandas de partículas que se desintegran y se vuelven a formar en sucesión rápida; retromezclado de sólidos; y velocidad de deslizamiento de las partículas con un orden de magnitud superior que el de la velocidad terminal de las partículas.

Numerosos investigadores han elaborado cartas o mapas de ubicación de los diversos regímenes de fluidización en sistemas gas-sólidos (Grace [53]; Van

Deemter [68]; Horio y colaboradores [73]; y Catipovic y colaboradores [67, 7]). El mapa mas apropiado y conveniente es el propuesto por Grace [53] conjuntamente con otros investigadores, en términos de la velocidad adimensional del gas (u^*) en función del diámetro adimensional de las partículas (dp^*). (Figura 2.4).

En el mapa de Grace [53, 7] pueden destacarse los siguientes aspectos:

- a) El acanalamiento característico de los sólidos tipo D, según Geldart, y puede ocurrir a velocidades aun inferiores a la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}).
- b) Los lechos burbujeantes normales operan de manera estable en un amplio rango de condiciones y de tamaños de partículas, para partículas A y B, según Geldart. Para partículas más grandes estos lechos operan solamente en un intervalo relativamente estrecho de velocidades. Mientras que para partículas más pequeñas, el burbujeo se inicia solamente a velocidades de gas muchas veces superiores a U_{mf} , y persiste a velocidades bien alejadas de la velocidad terminal de las partículas.
- c) El inicio del flujo turbulento es gradual, aunque esto no se muestra claramente en el mapa mencionado (figura 2.4). No obstante, puede verse que ocurre más allá de la velocidad terminal (U_t) para sistemas con partículas muy pequeñas. Por otra parte, para partículas más grandes el flujo turbulento tiene lugar cerca de la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}), es decir, el régimen de flujo agitado.
- d) En cuanto a la fluidización rápida, ésta sólo es práctica para partículas muy pequeñas, y a velocidades muy elevadas (unas 1000 veces la U_{mf}).

2.5.3 Velocidad mínima de fluidización

Cuando se va a fluidizar un lecho, éste se tiene que expandir primero para luego empezar a fluidizar. La velocidad que se encuentra en el límite para que un lecho cambie de estado fijo a estado fluidizado, se conoce como velocidad mínima de fluidización. En este punto existe un equilibrio dinámico entre las fuerzas que el campo gravitatorio y el fluido ejercen sobre las partículas. Se han desarrollado varias investigaciones en torno al desarrollo de ecuaciones para determinar la velocidad mínima de fluidización, y se han obtenido resultados cuya variación depende del punto de vista metodológico del autor.

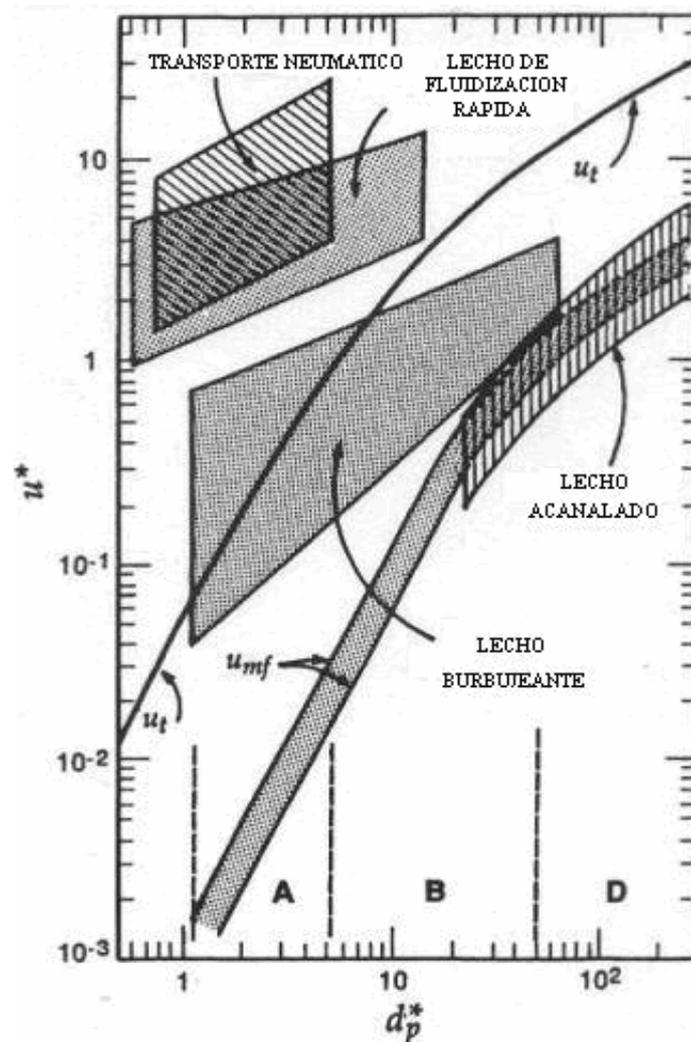


Figura 2.4: Mapa de regimenes de fluidización [7].

La velocidad mínima de fluidización es convencionalmente determinada por la dependencia de la caída de presión en el lecho con respecto a la velocidad del fluido que atraviesa el lecho (figura 2.5). El punto de intersección entre la línea de caída de presión del lecho completamente fluidizado y la línea para lechos fijos, representado en la gráfica superior como B, es tomada como el punto de mínima fluidización. Por lo tanto, es posible hallar una expresión que relacione u_{mf} con la caída de presión en el lecho fluidizado (ecuación 2.6), utilizando la ecuación de la caída de presión en lecho fijo descrita por Ergun (ecuación 2.4) [5].

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_g - \rho) \cdot g = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \cdot \frac{\mu \cdot u_{mf}}{d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot u_{mf}^2}{d_p} \quad (\text{Ec.2.6})$$

Donde:

ε_{mf} : porosidad del lecho a la velocidad mínima de fluidización (adimensional).

u_{mf} : velocidad mínima de fluidización (m/s).

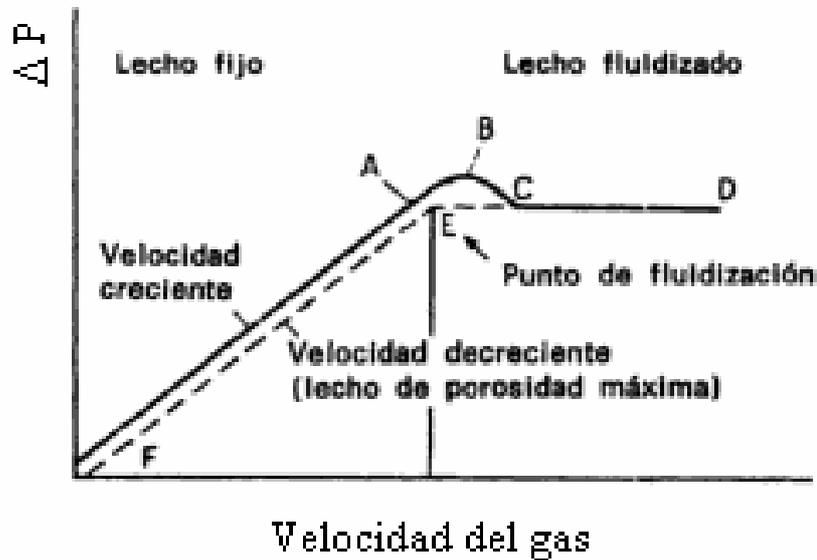


Figura 2.5: Caída de presión en función de la velocidad del gas. [5]

Estas ecuaciones dependen de manera importante de los valores de porosidad del lecho a fluidización mínima (ε_{mf}).

Para un manejo más fácil y simplificado, la ecuación 2.6 puede expresarse en términos de números adimensionales, como lo son el Reynolds (Re) (ecuación 2.7) y el Arquímedes (Ar) (ecuación 2.8):

$$\text{Re}_{mf} = \frac{u_{mf} \cdot \rho_g \cdot d_p}{\mu} \quad (\text{Ec.2.7})$$

$$\text{Ar} = \frac{d_p^3 \cdot g \cdot \rho_g \cdot (\rho - \rho_g)}{\mu^2} \quad (\text{Ec.2.8})$$

Rearreglando la ecuación 2.6, la ecuación de Ergun para un lecho de partículas esféricas, se puede escribir:

$$1,75 \cdot \frac{\text{Re}_{mf}^2}{\varepsilon_{mf}^3} + 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \cdot \text{Re}_{mf} - \text{Ar} = 0 \quad (\text{Ec.2.9})$$

Siendo:

Re_{mf} : reynolds a las condiciones de velocidad mínima de fluidización (adimensional).

Para un lecho de partículas no esféricas se introduce el concepto de diámetro equivalente en la ecuación 2.9, y se reescribe de la siguiente manera:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi} \cdot \text{Re}_{mf}^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi^2} \cdot \text{Re}_{mf} - \text{Ar} = 0 \quad (\text{Ec.2.10})$$

Para $\text{Re}_{mf} < 10$, se cumple que:

$$\text{Re}_{mf} = \frac{u_{mf} \cdot \rho_g \cdot d_p}{150 \cdot \mu} \quad (\text{Ec.2.11})$$

Finalmente se puede obtener una ecuación para la velocidad mínima de fluidización:

$$u_{mf} = \frac{\mu}{\rho_g \cdot d_p} \left[(1135,7 + 0,0408 \cdot \text{Ar})^{1/2} - 33,7 \right] \quad (\text{Ec.2.12})$$

Dependiendo del número de Arquímedes, la ecuación 2.12 se reduce a las formas siguientes:

$$u_{mf} = \frac{d_p^2(\rho - \rho_g)g}{1650\mu} \quad Ar < 10^3 \quad (\text{Ec.2.13})$$

$$u_{mf} = 0,202\sqrt{\frac{(\rho - \rho_g) \cdot g \cdot d_p}{\rho}} \quad Ar > 10^7 \quad (\text{Ec.2.14})$$

Los parámetros adimensionales ϵ_{mf} y Φ son difíciles de evaluar. Varios autores han propuesto distintos métodos para la estimación de estos parámetros; entre los más destacados se encuentra el de Wen y Yu [7], quienes propusieron un método generalizado que introduce dos constantes empíricas que relacionan la esfericidad y la porosidad, como se muestra a continuación:

$$\frac{1}{\epsilon_{mf}^3 \cdot \phi} \approx 14 \quad (\text{Ec.2.15})$$

$$\frac{1 - \epsilon_{mf}}{\epsilon_{mf}^3 \cdot \phi^2} \approx 11 \quad (\text{Ec.2.16})$$

Sin embargo, las correlaciones presentan limitaciones en cuanto a que son válidas para un rango de ϵ_{mf} entre 0,38 y 0,94; la esfericidad de 0,14 a 1,0 y una relación entre el diámetro de partícula y el diámetro de columna en el rango de $8 \cdot 10^{-4}$ a 0,25. Consecuentemente, las predicciones presentan un error de 3% para la ϵ_{mf} y un error de 11-14% para la velocidad mínima de fluidización. Usando las correlaciones de Wen y Yu [7], la ecuación 2.12 puede escribirse de la siguiente manera:

$$24,5 \cdot \text{Re}_{mf}^2 + 1650 \cdot \text{Re}_{mf} - Ar = 0 \quad (\text{Ec.2.17})$$

2.5.4 Velocidad terminal

La velocidad terminal, también conocida como velocidad de arrastre o velocidad máxima de fluidización, es la rapidez alcanzada por efecto del incremento de la velocidad del gas de fluidización, en donde la partícula es arrastrada y llevada fuera del lecho. A medida que se aceleran las partículas, se

alcanzará una fuerza de empuje tal que la resistencia propiciada por el fluido que la rodea sobrepasará a la fuerza de gravedad.

Para una amplia distribución de tamaños de partículas habrá un mayor arrastre de partículas finas que el de las de tamaño medio, pero la mayor parte de las finas se recuperan mediante separadores de filtros o ciclones. Algunos lechos fluidizados son operados con velocidades de 100 veces u_{mf} , con un alto rozamiento de sólidos, pero con una recuperación casi completa de estos sólidos arrastrados. El intervalo de velocidades útiles para la fluidización está comprendido entre u_{mf} y la velocidad de arrastre (u_t).

Haider y Levenspiel [54, 7] usaron la ecuación sugerida por Turton y Clark [55, 7] para aproximar la velocidad terminal de la partícula:

$$u_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744 \cdot \phi}{(d_p^*)^{0.5}} \right]^{-1} \quad 0,5 < \Phi < 1 \quad (\text{Ec.2.18})$$

La ecuación 2.18 introduce las variables adimensionales tamaño de partícula (d^*) y velocidad de gas (u^*); las cuales se definen a continuación:

$$d_p^* = d_p \cdot \left[\frac{\rho_g (\rho - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (\text{Ec.2.19})$$

$$u_t = u^* \cdot \left[\frac{\rho_g^2}{\mu (\rho - \rho_g) g} \right]^{1/3} \quad (\text{Ec.2.20})$$

Estas ecuaciones están basadas en la premisa de que cuando los sólidos con determinado tamaño de partículas caen reincorporándose al fluido, en ese momento la aceleración de dichas partículas tiende a cero y la velocidad se hace constante, que es la máxima alcanzada en estas condiciones.

2.6 ASPECTOS DE LA OPERACIÓN DE SECADO

2.6.1 Mecanismos y cinética de secado. Transferencia de calor y de masa.

La operación de secado es una operación unitaria de transferencia simultánea de calor y masa por contacto gas-sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida en el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa. Un elemento fundamental en el proceso de secado es el estudio de la intensidad de la transferencia de masa en el mismo. Para esto es necesario conocer los elementos más útiles de la transferencia de calor y masa que funcionan en los secadores de contacto directo.

. Cuando se seca un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos:

- Transmisión del calor para evaporar el líquido.
- Transferencia de masa en humedad interna y líquido evaporado.

Las condiciones externas están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y de masa de la capa límite del gas, y en el caso que predominen dichas condiciones externas, el secado no dependerá de las características del sólido sino de las condiciones del gas, y estará controlado por la transferencia de masa y calor entre el gas y la superficie del sólido. En la evaporación se emplea todo el calor que se recibe del gas, y la superficie del sólido se comporta como una superficie libre de agua.

Mientras que las condiciones internas están definidas por la transferencia simultánea de calor y de masa a través del sólido, en el caso de que estas condiciones internas controlen la operación de secado, la resistencia a la transferencia de masa a través del material será muy superior a la de la capa límite

del gas, la difusión interna dominará el proceso y lo más importante serán las propiedades del sólido.

Independientemente del mecanismo de transmisión de calor el cual puede ser por conducción, convección, radiación o una combinación de cualquiera de estos, el calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde ésta al interior del sólido.

2.6.2 Definiciones relacionadas a la operación de secado

Para una mayor comprensión de la operación de secado es necesario describir ciertos términos utilizados, entre los cuales se tienen:

a. Temperatura de bulbo húmedo

Es la temperatura en equilibrio alcanzada por una superficie de evaporación, cuando la velocidad de calor transferido a la superficie por convección es igual al calor perdido por evaporación. En este caso se mide con un termómetro en contacto con aire en movimiento y que posee una mecha saturada con agua. Esta temperatura depende de la temperatura y de la humedad del aire utilizado para la evaporación.

b. Temperatura de bulbo seco

Mide la temperatura ambiental del aire gas en un recinto, y suele ser tomada con un termómetro de mercurio, o con un termopar.

c. Temperatura de rocío

Es la temperatura hasta la cual la mezcla dada (aire-vapor de agua) debe enfriarse, para obtener la saturación. En otras palabras, es la temperatura a la cual puede haber la máxima cantidad de humedad sin que ocurra la condensación. Para que el aire sea útil para el proceso de secado a una humedad absoluta determinada,

la temperatura ambiental debe elevarse de manera tal que a cualquiera de esas temperaturas el aire no esté completamente saturado y que pueda aceptar más vapor de agua.

d. Diagrama psicrométrico

Un diagrama o carta psicrométrica incluye curvas de representaciones gráficas de la relación entre temperatura y humedad del vapor de agua en el aire, en un sistema a presión constante. Adicionalmente puede contener gráficas e informaciones como volúmenes específicos, temperaturas de bulbo húmedo, entalpías de la mezcla saturada, puntos de rocío, etc. Ver figura 2.6.

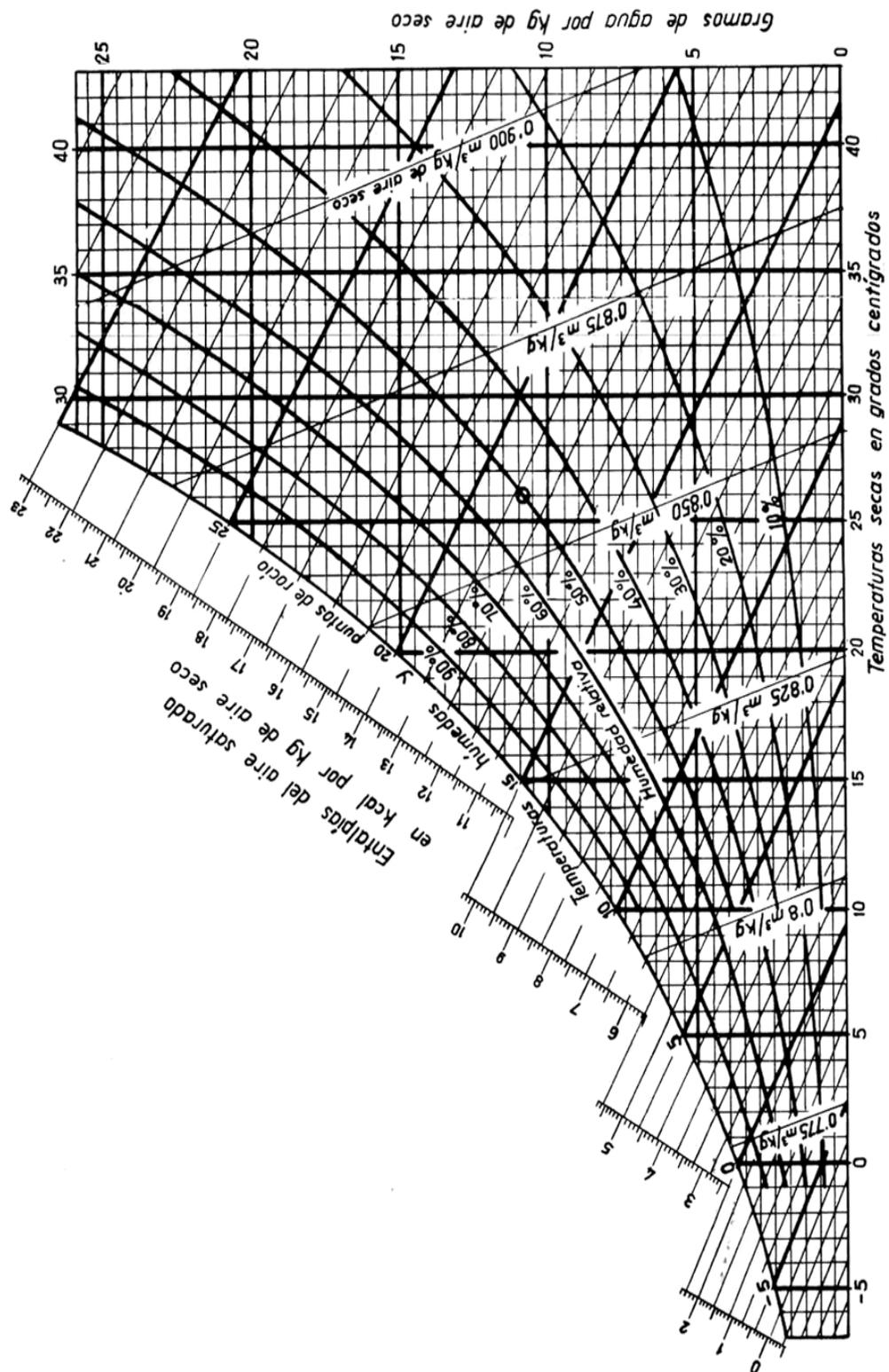


Figura 2.6: Carta psicométrica [8].

e. Humedad absoluta

Es la concentración del vapor de agua en el gas, y se refiere a la masa de vapor de agua por masa de aire seco [9]. La humedad depende solamente de la presión parcial del vapor en la mezcla cuando se fija la presión total.

f. Humedad relativa

Es la humedad a la cual la presión parcial del vapor de agua en el aire es igual a la presión de vapor de agua libre a la misma temperatura. Se define como la relación entre los moles de vapor por mol de gas libre de vapor y los moles de vapor que estarían presentes por mol de gas libre de vapor, si la mezcla estuviera completamente saturada a la temperatura y presión total.

g. Humedad porcentual

Es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica. Se expresa en porcentaje y está normalizada de forma que la humedad relativa máxima posible es el 100%.

h. Humedad de equilibrio

Es la humedad del sólido cuando su presión de vapor de agua se iguala a la presión de vapor del gas; es decir, la humedad del sólido cuando está en equilibrio con el gas, y es representada como X^* .

i. Humedad libre

Es la humedad del sólido que está en exceso con relación a la humedad de equilibrio. Esta es la humedad que se puede evaporar y depende de la concentración de vapor en la corriente gaseosa, definida como X_L .

Existen otras definiciones como humedad límite o ligada, que es la humedad del sólido que ejerce una presión de vapor de equilibrio menor que aquella que ejerce el líquido puro a la misma temperatura; y la humedad no límite

(no ligada) que es la humedad del sólido que ejerce una presión de vapor igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

En la figura 2.7 se muestran representadas dichas humedades.

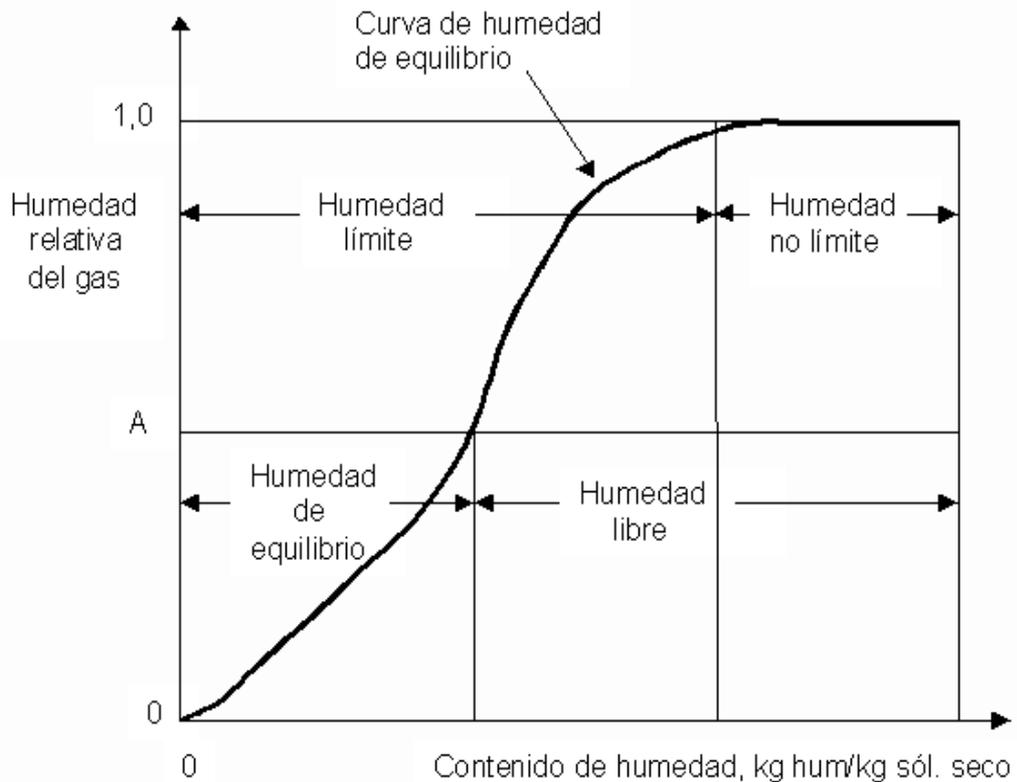


Figura 2.7: Tipos de humedades [9].

2.6.3 Clasificación de la operación de secado

Las operaciones de secado pueden clasificarse ampliamente. Para una mayor comprensión se toman en cuenta tres criterios de clasificación por el método de operación (por lotes o continuo), por el método de obtención del calor necesario para la evaporación de la humedad; y por la naturaleza de la sustancia que se va a secar.

- Método de operación, por lotes o continuo: un equipo por lotes opera de manera intermitente, es decir la operación es interrumpida para una nueva carga de material a secar; mientras que los equipos continuos operan de manera ininterrumpida y el material a secar es alimentado constantemente.

- Método del calor necesario para la evaporación de la humedad, directo o indirecto: en los secadores directos el calor se obtiene completamente por contacto directo de la sustancia con el gas caliente en el cual tiene lugar la evaporación. En los secadores indirectos, el calor se obtiene de manera independiente del gas y se utiliza para arrastrar la humedad evaporada, es decir, la transmisión de calor hasta el material húmedo es a través de la pared que lo contiene, eliminándose el líquido vaporizado independientemente del medio calefactor [10].

Cuando dos objetos que están a temperaturas diferentes se ponen en contacto térmico, el calor fluye desde el objeto a temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja. El flujo neto se produce siempre en el sentido de la temperatura decreciente. Los mecanismos por los que fluye el calor son: conducción, convección y radiación. [10]

a) Conducción

Para que la energía se transfiera por conducción es necesario que en el cuerpo exista un gradiente de temperatura, donde la energía fluya desde la región de alta temperatura hacia la región de más baja temperatura. No se ha comprendido en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe en parte al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor.

b) Convección

La convección es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua, etc.) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. Una de estas zonas es una superficie e interfase. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Éstos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, disminuyen su densidad y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la

parte superior y que está a menor temperatura. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido [10]. Existen dos tipos de convección: natural y forzada.

c) Radiación

La radiación térmica es la radiación electromagnética emitida por un cuerpo como resultado de la temperatura. El fenómeno de la radiación consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

Entre los tipos de radiación se encuentra la infrarroja la cual es una radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas. La radiación infrarroja es emitida por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor que 0°K , es decir, -273°C (cero absoluto).

- Naturaleza de la sustancia que se va a secar: cada sustancia tiene sus propiedades características, que tienen su efecto sobre la operación de secado. La sustancia puede ser rígida, flexible, porosa o no porosa. La forma física de la sustancia es quizás una de las determinantes al momento de escoger el secador.

2.7 CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO

El secado es una operación difícil de describir, debido a la complejidad de los fenómenos internos y externos involucrados en el proceso, debido a que el conocimiento del secado resulta incompleto, pues salvo en algunas excepciones, es necesario apoyarse en algunas mediciones experimentales. Se ha utilizado ampliamente el método de la curva de secado característica, la cual permite simular el comportamiento del material a través del tiempo.

La cinética de secado de un material no es más que la dependencia de la humedad del material y de la intensidad de evaporación con el tiempo, o variables

relacionadas con éste, como la propia humedad o las dimensiones del equipo. La intensidad de evaporación se determina a través de la velocidad de secado, que es el cambio de humedad (base seca) en el tiempo.

Las mediciones de la rapidez del secado por lotes son relativamente fáciles y proporcionan mucha información, no sólo para la operación por lotes sino también para la continua.

A partir de datos obtenidos durante pruebas de la operación de secado, se puede conocer la humedad de equilibrio y con ésta la humedad libre, como lo muestra la ecuación 2.21, la cual se grafica de manera tal que se pueda observar la pérdida de humedad a medida que transcurre el tiempo (figura 2.8).

$$X_L = X_t - X^* \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Se puede obtener mucha información si los datos se convierten a velocidades de secado, mediante la ecuación 2.22, expresados como masa/tiempo(área), y se grafican en función del contenido de humedad (figura 2.9).

$$R = \frac{Ls}{A} \times \frac{dX}{dt} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Generalmente se pueden apreciar dos partes notorias de la curva de velocidad de secado: un periodo de velocidad constante y un periodo de velocidad decreciente, aunque teóricamente existen tres etapas del proceso de secado.

Etapas A-B: es una etapa de calentamiento inicial del sólido, normalmente de poca duración, en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad. En esta etapa el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta que se logre el equilibrio entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor de los gases. Este equilibrio se alcanza a la temperatura de bulbo húmedo del gas.

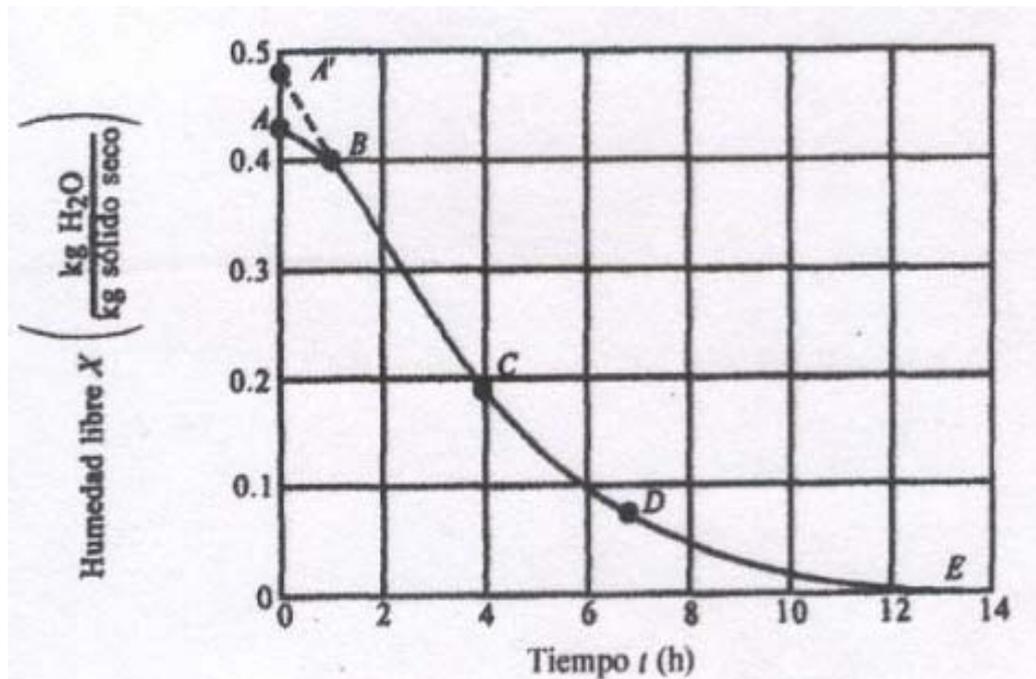


Figura 2.8: Humedad libre en función del tiempo [11].

Etapa B-C: denominado periodo a velocidad de secado constante; donde se evapora la humedad libre no ligada del material y predominan las condiciones externas. En este período el sólido tiene un comportamiento no higroscópico. La velocidad de secado se mantiene constante y el gas presenta una condición en estado estacionario, en general depende sólo de las propiedades y velocidad del gas. Si durante este proceso el gas se enfría, la velocidad de secado decrece, pero sigue en esta zona dependiendo de factores externos al sólido.

Durante este período la temperatura del sólido se mantiene igual a la de bulbo húmedo del gas, ya que se mantiene el equilibrio alcanzado al final de la etapa de calentamiento.

Etapa C-E: etapa de velocidad decreciente; es el segundo período de secado donde se evapora agua no ligada del sólido y predominan las condiciones internas y externas, simultáneamente. En estas condiciones el sólido tiene un comportamiento higroscópico. Durante este período, la temperatura del material sobrepasa la de bulbo húmedo debido a que el descenso de la velocidad de secado

rompe el equilibrio térmico que mantiene estable la temperatura y una parte considerable del calor se emplea en el calentamiento del sólido.

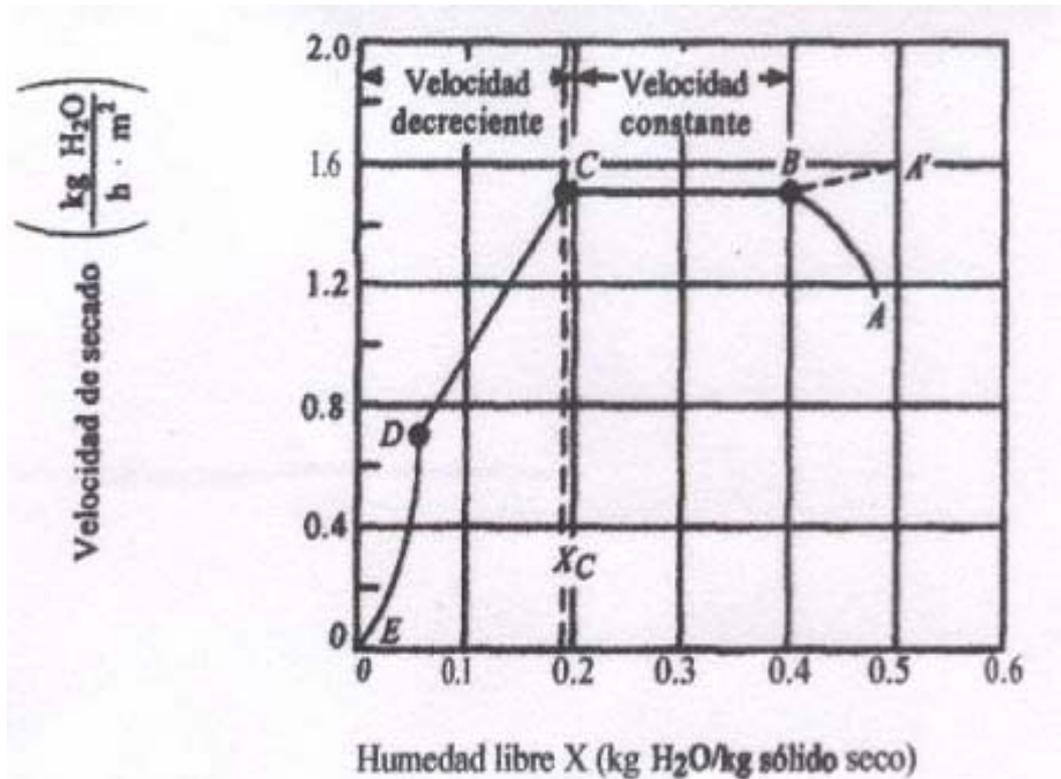


Figura 2.9: Velocidad de secado en función de la humedad libre [11].

2.8 BALANZA DE DETERMINACION DE HUMEDAD (OHAUS)

La balanza de humedad Ohaus modelo MB200, se caracteriza por poseer una modalidad de autosecado; está diseñada para la determinación rápida y automática del contenido de humedad en sólidos o líquidos, utilizando una fuente de calor infrarroja. La balanza es programable para varios niveles de temperatura y distintos periodos de tiempo. Una balanza integrada pesa la muestra antes y después de la prueba. El cálculo de la pérdida y de contenido de humedad es automático.



Figura 2.10: Balanza Ohaus MB 200.

2.9 BALANCE DE MASA Y ENERGIA

2.9.1 Balance de masa

Los balances de materia son la aplicación de la ley de la conservación de la masa: “La materia no se crea ni se destruye” [12], donde se cuantifica el material que se utiliza en un proceso o sistema.

2.9.2 Balance de energía

Al igual que la masa, la energía se conserva y obedece a la ley de la conservación de la energía que también se denomina Primera Ley de la Termodinámica. Todo el intercambio de energía entre un sistema y sus alrededores se hace como calor y trabajo, y el cambio en la energía total de los alrededores es igual a la energía neta transferida hacia o desde él como calor y trabajo.

2.9.3 Sistema y alrededores

El sistema es la parte específica que interesa del proceso; puede tener cualquier tamaño dependiendo de las condiciones particulares y sus fronteras pueden ser reales o imaginarias, rígidas o flexibles. Mientras que los alrededores es todo aquello con lo que el sistema interactúa.

2.9.4 Entalpía

Es la cantidad de energía de un sistema termodinámico que éste puede intercambiar con su entorno; es decir, el calor se puede absorber o liberar. La entalpía (H) es una propiedad extensiva, y su magnitud depende de la cantidad de materia presente. Es imposible determinar la entalpía de una sustancia; por lo tanto, lo que se mide realmente es el cambio de entalpía ΔH .

La entalpía se define en función de algún estado de referencia; la determinación del estado de referencia requiere que se especifiquen: presión, temperatura, fase y composición del sistema.

2.9.5 Funciones de estado

Es cualquier función que depende sólo del estado de la materia (temperatura, presión, fase y composición) y no de la trayectoria para llegar ahí. La entalpía específica es un ejemplo de función de estado.

2.9.6 Capacidad calorífica

La capacidad calorífica de una sustancia es la cantidad de calor necesario para elevar un grado Celsius la temperatura de una determinada cantidad de la sustancia. Indica la mayor o menor dificultad que presenta dicho cuerpo para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. Puede interpretarse como una medida de inercia térmica. Es una propiedad extensiva, ya que su magnitud depende de la cantidad de material en el objeto. La capacidad

calorífica a presión constante se denota con el símbolo C_p . Para cálculos de entalpía se puede emplear la ecuación 2.23.

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (\text{Ec.2.23})$$

Casi todas las ecuaciones para la capacidad calorífica de los sólidos, líquidos y gases son empíricas. La capacidad calorífica varía con la temperatura pero es función continua sólo en la región entre las transiciones de fase. Los ingenieros han determinado experimentalmente la ecuación 2.24 entre el intervalo de temperaturas en las que ocurre la transición de fase [13].

$$C_p = a + bT + cT^2 \quad (\text{Ec.2.24})$$

2.9.7 Calor estándar de combustión

Es un método efectivo cuando ocurren reacciones químicas de combustión. Para calcular los cambios de entalpía, ΔH°_c , dicho método contiene una serie de condiciones de referencia:

- a) El compuesto se oxida con oxígeno o alguna otra sustancia hasta dar los productos $\text{CO}_2(\text{g})$ y $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$.
- b) Las condiciones de referencia son 25°C y 1 atm.
- c) Se asigna el valor de cero a ΔH°_c de algunos de los productos de oxidación, como son $\text{CO}_2(\text{g})$ y $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ y al $\text{O}_2(\text{g})$.

2.10 UTILIZACION DIRECTA DE PRODUCTOS DE COMBUSTION EN EL SECADO

Esta aplicación tiene la ventaja de proporcionar ahorros energéticos, y sustituir el calentamiento indirecto por contacto directo. En el sistema directo los productos de combustión son diluidos con aire para alcanzar el nivel térmico adecuado.

El secado industrial de los finos de mineral de hierro ocurre en contracorriente con los gases de combustión; el aire es suministrado por los

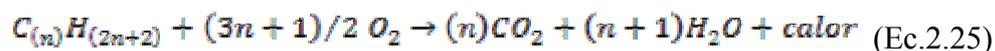
ventiladores y se mezcla con el gas natural para producir la combustión. Este fenómeno ocurre dentro de una cámara de combustión que contiene dos quemadores que proporcionan las temperaturas elevadas para que los gases se calienten y se pueda llevar a cabo la operación de secado.

2.10.1 Combustión

La combustión es una reacción química exotérmica entre un combustible y el oxígeno. Esta reacción se caracteriza por la generación de calor, luz y gases (CO_2 y H_2O).

2.10.2 Combustión Completa

Es cuando cuantitativamente el combustible se quema totalmente. Es necesario el aire en exceso para garantizar una combustión completa, debido a que la mezcla perfecta del combustible y aire no es posible. La ecuación estequiométrica de una combustión perfecta y completa se puede representar como:



2.10.3 Combustión incompleta

Para considerar que una combustión sea incompleta es necesario que una parte del combustible no reaccione, a consecuencia de que el oxígeno haya sido suficiente, dando lugar a la formación de CO además de CO_2 y H_2O .

2.10.4 Aire teórico

Es la cantidad de aire necesaria para que un combustible pueda lograr una combustión perfecta.

2.10.5 Exceso de aire

En la práctica, es casi imposible obtener una mezcla homogénea y total del combustible con el comburente (aire u oxígeno directos). Esto obliga a emplear una cantidad real de aire mayor a la estequiométrica, con el propósito de producir una combustión lo más completa posible.

Mientras mayor es el exceso de aire, menor es la probabilidad de una combustión incompleta, pero también disminuye la temperatura de la reacción y la eficiencia térmica del proceso. Por lo tanto, se debe tratar de emplear el exceso de aire mínimo para que se quemé la totalidad del combustible.

CAPITULO 3

DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR DE MINERAL: DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO, DENSIDAD A GRANEL, POROSIDAD, DENSIDAD APARENTE, COMPOSICIÓN QUÍMICA Y DIÁMETRO PROMEDIO DE LAS PARTÍCULAS (BASE ÁREA Y BASE VOLUMEN).

3.1.1 Distribución del tamaño de partícula

Para la distribución de tamaño se utilizaron los resultados granulométricos que incluye las mallas 1/2", 3/8", 1/4", 6, 10, 16, 60, 100 y -100 *mesh*, de los ensayos realizados por el personal del Laboratorio de Física de Orinoco Iron, para la muestra de hierro alimentado (M0) tomada para la experiencia de secado del mineral de hierro. Los resultados se muestran en la tabla 4.1.

Inicialmente se tienen los valores de apertura de las mallas en *mesh*, los cuales fueron convertidos a micrones haciendo uso de la tabla A.1 y los pesos retenidos fueron llevados a porcentaje con la ecuación 3.1:

$$\%retenido = \left(\frac{PR}{\sum_{i=1}^n PR_i} \right) \cdot 100 \quad (\text{Ec.3.1})$$

Donde:

PR: peso retenido (g).

n: número total de pesos retenidos por todas las mallas.

i: identificación de peso retenido entre los tamices superior (i) e inferior (i+1).

Finalmente se promediaron los rangos de los diámetros entre el tamiz superior y el inferior, como se muestra:

$$\overline{dp}_i = \frac{dtamiz_{SUP} + dtamiz_{INF}}{2} \quad (Ec.3.2)$$

Donde:

\overline{dp}_i : diámetro promedio de abertura de tamiz entre dos tamices consecutivos (μm).

$dtamiz_{SUP}$: diámetro o abertura de un tamiz superior (μm).

$dtamiz_{INF}$: diámetro o abertura de un tamiz inferior (μm).

3.1.2 Densidad a granel

Para determinar la densidad a granel fue necesario conocer el contenido de humedad del sólido pues dicha densidad depende de la humedad del sólido.

A la muestra de mineral de hierro alimentada al secador se le determinó la densidad a granel mediante el procedimiento siguiente:

1. Se recolectó la masa de muestra de mineral y se depositó en un envase hermético.
2. Se pesó 100 g de la muestra de mineral recolectada.
3. La muestra fue vertida en un cilindro graduado de 250 ml de capacidad y se tomó las lecturas mayor y menor del volumen ocupado por el material sólido a granel.
4. Se obtuvo un promedio entre ambas lecturas.
5. Finalmente, se dividió la masa del mineral entre el promedio de lecturas correspondientes al volumen registrado en el cilindro y se calculó la densidad a granel.

3.1.3 Porosidad

La porosidad del mineral de alimentación fue determinada para calcular la velocidad mínima de fluidización mediante la ecuación 2.15 [7] una vez conocido el factor de esfericidad. El valor de la porosidad resultante es reportado en la tabla 4.2. El parámetro adimensional de esfericidad fue evaluado según un estudio especial confidencial, para Orinoco Iron [14], realizado por RECAT Technologies Inc., Canadá.

3.1.4 Densidad aparente

El valor de densidad aparente fue tomado del mismo estudio realizado por la empresa canadiense RECAT Technologies Inc [14], mencionado arriba. El valor se reporta en la tabla 4.2.

3.1.5 Composición química

Los análisis para determinar la composición química del mineral fueron llevados a cabo y proporcionados por el Laboratorio de Química de la empresa Orinoco Iron, su determinación se basa en normas COVENIN. Las normas utilizadas se muestran en la tabla 3.1.

3.1.6 Diámetro promedio de las partículas (base área y base volumen)

Para realizar los cálculos de diámetro promedio base área y base volumen, fueron requeridos los cálculos utilizados para estimar distribución de tamaños de partículas, tales como: conversión de abertura de tamices de *mesh* a micrones, porcentaje de peso retenido y diámetro promedio de partículas.

Posteriormente se calculó la fracción másica (x_i) con los valores de porcentaje para cada malla o tamiz, como sigue:

$$x_i = \frac{\%retenido}{100} \quad (\text{Ec.3.3})$$

Para conocer el diámetro promedio base área, se procedió a través de la ecuación 3.4; y para el diámetro promedio base volumen se calculó con la ecuación 3.5.

Tabla 3.1: Normas COVENIN para la determinación de la composición química.

NORMA COVENIN	TITULO
1237:2001	Minerales de hierro y productos siderúrgicos. Determinación del hierro total. Método de reducción con cloruro estannoso y titulación con dicromato de potasio.
1228:2000	Minerales de hierro y productos siderúrgicos. Determinación de sílice. Parte 1: Método gravimétrico. Minerales de hierro y productos siderúrgicos. Determinación de sílice. Parte 2: Método espectrofotométrico
1356:2000	Minerales de hierro y productos siderúrgicos. Determinación del contenido de aluminio, calcio, magnesio y manganeso por espectrometría de absorción atómica.
1724:1998	Mineral de hierro y productos siderúrgicos. Determinación de las pérdidas por calcinación.
1686:2004	Minerales de hierro y productos siderúrgicos. Determinación de fósforo por el método espectrofotométrico del vanadato de amonio.
3403:2001	Minerales de hierro y productos siderúrgicos. Hierro de reducción directa. Determinación del contenido de carbono y azufre. Método de absorción infrarrojo después de la combustión en horno de inducción.

$$dp_A = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{dp_i} \right)} \quad (\text{Ec.3.4})$$

Siendo:

dp_A : diámetro promedio base área (μm).

$$dp_v = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot \overline{dp}_i) \quad (\text{Ec.3.5})$$

Donde:

dp_v : diámetro promedio base volumen (μm).

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL GAS DE FLUIDIZACIÓN: DENSIDAD Y VISCOSIDAD A LA TEMPERATURA Y PRESIÓN DEL LECHO, VELOCIDAD SUPERFICIAL DE FLUIDIZACIÓN EN EL SECADOR DE MINERAL.

La temperatura y presión del lecho son reportadas en la tabla de datos en la tabla B.1. Los valores fueron tomados del sistema I.B.H (International Briquettes Holding) en Orinoco Iron.

3.2.1 Densidad del gas de fluidización

La densidad de cada compuesto del gas de fluidización se calculó de la siguiente manera:

$$\rho_{gi} = PM_i \cdot \frac{P}{RT} \quad (\text{Ec.3.6})$$

Donde:

ρ_{gi} : densidad del gas por componente (kg/m^3).

PM_i : peso molecular de cada componente (kg/kmol).

R : constante de los gases ideales ($\text{atm.m}^3/\text{kmol.K}$).

p : presión del lecho (atm).

T : temperatura del lecho (K).

La densidad para una mezcla de gases, se procedió como sigue:

$$\rho_{mezcla} = \sum (\rho_{gi} \cdot y_i) \quad (\text{Ec.3.7})$$

Siendo:

ρ_{mezcla} : densidad de la mezcla (kg/m^3).

y_i : fracción de gaseosa de cada componente presente en la mezcla.

3.2.2 Viscosidad del gas de fluidización

Para el cálculo de viscosidad se utilizó el nomograma anexo en la figura A.1, para estimar las viscosidades de gases que componen al gas de fluidización a la temperatura del lecho. Los resultados se muestran en la tabla B.3.

Posteriormente se calculó la viscosidad de la mezcla con la ecuación 3.8, como se muestra a continuación:

$$\mu_{mezcla} = \sum (\mu_{gi} \cdot y_i) \quad (\text{Ec.3.8})$$

Donde:

μ_{mezcla} : viscosidad de la mezcla (kg/m.s).

μ_{gi} : viscosidad del gas por componente (kg/m.s).

3.2.3 Velocidad superficial del gas de fluidización

La velocidad superficial (flujo volumétrico) del gas es reportado por el personal de sala de control de Orinoco Iron y representa un valor de volumen en una base de tiempo (Nm^3/h), para la conversión a flujo real, se utilizó la ecuación:

$$V_o = F n_i \cdot \frac{P_{CN}}{P_L} \cdot \frac{T_L}{T_{CN}} \quad (\text{Ec.3.9})$$

Donde:

$F n_i$: flujo volumétrico normal ($\text{m}^3\text{N/h}$).

V_o : flujo volumétrico real (m^3/h).

P_{CN} : presión a condiciones normales (bar).

P_L : presión en el lecho (bar).

T_{CN} : temperatura a condiciones normales.

T_L : temperatura en el lecho (K).

Con el diámetro del secador (ver sección 2.3.1) por donde circula el gas, se calculó el área y así finalmente se determinó la velocidad del gas. Algebraicamente se muestra a continuación:

$$U_o = \frac{V_o}{A} = \frac{V_o}{\pi/4 \cdot d^2} \quad (\text{Ec.3.10})$$

Siendo:

U_o : velocidad superficial de gas de fluidización (m/s).

A: área transversal del secador (m^2).

D: diámetro del secador (m).

3.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS (VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN Y TERMINAL DE LAS PARTÍCULAS), Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL LECHO FLUIDIZADO (CLASIFICACIÓN DE PARTÍCULAS SEGÚN GELDART Y RÉGIMEN DE FLUIDIZACIÓN) EN EL SECADOR.

3.3.1 Velocidad mínima de fluidización

La velocidad mínima requiere ciertos parámetros (densidad aparente de la partícula, densidad del gas de fluidización, diámetro promedio base área y viscosidad del gas) característicos del gas y del sólido mostrados en la tabla 4.4.

El parámetro ε_{mf} se calcula haciendo uso de la ecuación 2.15, una vez conocido el factor de esfericidad (Φ).

Las ecuaciones para calcular la velocidad mínima de fluidización son las 2.13 y 2.14, dependiendo del número de Reynolds según la ecuación 2.7, se escoge la ecuación adecuada.

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho - \rho_g) g}{1650 \mu}$$

$$u_{mf} = 0,202 \sqrt{\frac{(\rho - \rho_g) \cdot g \cdot dp_A}{\rho}}$$

3.3.2 Velocidad terminal de las partículas

El cálculo de la velocidad terminal se realizó con la ecuación 2.20, la cual incluye los parámetros adimensionales que se determinaron con las ecuaciones 2.18 y 2.19, algebraicamente se tiene:

$$u_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744 \cdot \phi}{(d_p^*)^{0.5}} \right]^{-1}$$

$$d_p^* = d_p \cdot \left[\frac{\rho_g (\rho - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{1/3}$$

$$u_t = u^* \cdot \left[\frac{\rho_g^2}{\mu (\rho - \rho_g) g} \right]^{1/3}$$

3.3.3 Clasificación de partículas estándar según Geldart

Es de importancia destacar que para los cálculos referentes a fluidización el diámetro promedio utilizado es base área.

Una vez realizada la distribución de tamaño de partículas para conocer el diámetro promedio y la diferencia entre la densidad del gas de fluidización y la aparente, se graficaron estos valores en la figura 2.2, de manera tal de conocer en qué régimen de fluidización se ubican las partículas estudiadas. La representación se puede apreciar en la figura 4.4.

3.3.4 Régimen de fluidización

Con la gráfica 2.4, y el valor de los parámetros adimensionales dp^* y u^* (ecuación 2.18 y 2.19 respectivamente), correspondientes al valor de diámetro promedio base área reportado en la tabla 4.2, se determinó el tipo de régimen al que pertenece el sistema.

3.4 DETERMINAR EL EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DE LOS SÓLIDOS DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR DE MINERAL SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS CINÉTICAS DE SECADO Y LAS CURVAS DE VELOCIDAD DE DESHIDRATACIÓN, EN FUNCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE HUMEDAD LIBRE EN LOS SÓLIDOS.

3.4.1 Recolección de la muestra de mineral de hierro

La muestra de mineral de hierro alimentado es denominada por la planta como M0, fue recolectado a la salida de la operación de cribado y antes de la operación de secado. Se estima una cantidad considerable para poder realizar el tamizado de la diversa granulometría que presenta el mineral, aproximadamente 10 kilogramos de M0.

La metodología empleada para el tamizado es la misma seguida en la rutina del Laboratorio de Física del personal que labora en Orinoco Iron. La técnica de preparación de la muestra para realizar los ensayos físicos incluye el cuarteo que consiste en homogenizar lo mejor posible la mencionada muestra, la técnica se basa en varias etapas y trata de retirar los sólidos de gran tamaño.

3.4.1.1 Determinación granulométrica del mineral de hierro alimentado a la planta de Orinoco Iron:

- a) Homogenizar la muestra lo más que se pueda.
- b) Pesar los 5 recipientes antes de llenarlos de mineral de hierro.
- c) Llenar un recipiente con la muestra original.
- d) Una vez cuarteada la muestra, se procede a llevarla a una batería de tamices que incluye las mallas de: 6, 10, 16, -16 *mesh* por un período de 7 minutos.
- e) Repetir el tamizado tantas veces como para completar los recipientes de plásticos compactos.

- f) Asegurarse de que los recipientes estén bien cerrados, para evitar que escape la humedad.
- g) Pesar los recipientes una vez llenos de mineral.
- h) Almacenar los recipientes, una vez llenos, en un sitio seco hasta realizar las pruebas de secado en la balanza Ohaus.

3.4.2 Método de la estufa

Para determinar el sólido totalmente seco se realizan los siguientes pasos:

- a) Encender la estufa y esperar que alcance los 100°C.
- b) Pesar los 5 crisoles a utilizar antes de agregar el mineral en su interior.
- c) Pesar 2 gramos aproximadamente, de cada muestra de mineral para los diferentes tamaños de partículas (6, 10, 16 y -16 mesh).
- d) Introducir las muestras a la estufa y dejar secar por un tiempo aproximado de 1 hora y media.
- e) Pesar cada una de las muestras una vez concluido el tiempo.

Sabiendo que la masa de sólido húmedo (m_H) contiene cierta cantidad de agua más el sólido, se puede escribir así:

$$m_H = m_{STS} + m_{H_2O} \quad (\text{Ec.3.11})$$

Donde:

m_H : masa de sólido húmedo (g).

m_{STS} : masa de sólido totalmente seco (g).

m_{H_2O} : masa de agua (g).

Para llevar la ecuación anterior a base seca se divide entre el sólido totalmente seco:

$$\frac{m_H}{m_{STS}} = \frac{m_{STS}}{m_{STS}} + \frac{m_{H_2O}}{m_{STS}} \quad (\text{Ec.3.12})$$

Por definición se sabe:

$$X = \frac{m_{H_2O}}{m_{STS}} \quad (\text{Ec.3.13})$$

Donde:

X: fracción agua base seca (kg agua/kg ss).

Sustituyendo la ecuación en 3.18 y simplificando:

$$\frac{m_H}{m_{STS}} = 1 + X \quad (\text{Ec.3.14})$$

Ordenando la ecuación 3.20 se tiene:

$$X = \frac{m_H}{m_{STS}} - 1 \quad (\text{Ec.3.15})$$

Llevando la ecuación anterior con los datos obtenidos de las masas de muestras húmedas y secas, se puede escribir de la siguiente manera:

$$X_i = \frac{m_{HUMEDA} - m_{CRISOL}}{m_{SECO} - m_{CRISOL}} - 1 \quad (\text{Ec.3.16})$$

Se realizan los cálculos correspondientes a las ecuaciones anteriores para cada muestra (6, 10, 16 y -16 *mesh*) y para la muestra original de mineral de hierro.

3.4.3 Determinación de la pérdida de humedad mediante la balanza Ohaus.

La metodología a seguir para la pérdida de humedad es bastante sencilla, consiste en los siguientes pasos:

- a) Realizar una prueba para determinar el tiempo y temperatura, estimado, en donde cesa el secado.
- b) Programar la balanza con temperatura 110°C, presión 1 atm y tiempo hasta peso constante.
- c) Colocar en la bandeja de la balanza una masa aproximada a 20g de la muestra original de mineral de hierro.

- d) Registrar la pérdida de humedad a medida que transcurre cada minuto.
- e) Pesar la muestra seca, una vez concluido el secado.
- f) Repetir la experiencia para cada muestra (malla 6, 10, 16 y -16).
- g) Realizar unas corridas adicionales para la malla 6 y la muestra original para comparar la desviación.

El método de la estufa se realizó con una diferencia de tiempo de las pruebas que se realizaron para el secado de mineral de hierro con la balanza Ohaus, por ende las muestras perdieron humedad y los cálculos de sólido totalmente seco resultaron incongruentes, por lo cual se tomó como valor de sólido totalmente seco la última pesada registrada para cada muestra, una vez culminada cada corrida en la balanza ohaus. La humedad inicial si se tomó de los cálculos realizados con el método de la estufa.

3.4.4 Construcción de las graficas de pérdida de humedad y de velocidad de secado.

La balanza Ohaus arrojó los valores de humedad en función del porcentaje retirado. Inicialmente se calculó la pérdida de masa de los sólidos a medida que transcurre el tiempo (m_{SS_T}), como lo muestra la ecuación:

$$m_{SS_T} = \frac{(100 - \%H_{BH}) \cdot m_H}{100} \quad (\text{Ec.3.17})$$

Siendo:

$\%H_{BH}$: humedad base húmeda expresada en porcentaje.

m_{SS_T} : masa del sólido parcialmente seco a medida que transcurre el tiempo (g).

Con las humedades en base húmeda (H_{BH}) registradas mediante la balanza Ohaus, se obtuvo la cantidad de agua retenida en los sólidos a medida que transcurre el tiempo, con la siguiente ecuación:

$$m_{H_2O_R} = m_{SS_T} - m_{STS} \quad (\text{Ec.3.18})$$

Donde:

$m_{H_2O_R}$: masa de agua retenida por los sólidos a diferentes tiempos (g).

Se obtuvo la humedad en base seca (X_{BS}) como se muestra en la ecuación:

$$X_{BS} = \frac{m_{H_2O_R}}{m_{SS_T}} \quad (\text{Ec.3.19})$$

Finalmente se determinó la humedad en el equilibrio para cada caso, y así poder conocer la humedad libre, como se muestra a continuación:

$$X_L = X_{BS} - X^* \quad (\text{Ec.3.20})$$

Por ultimo se graficó la humedad libre versus el tiempo. Para una mejor representación de las gráficas a las curvas de pérdida de humedad se le aplicó regresión lineal y no lineal, dependiendo de la tendencia que arrojó cada gráfica.

El método de escogencia para la regresión lineal y no lineal consistió en tomar la mejor recta o curva y se le aplicó la regresión a esa sección de las graficas.

Las ecuaciones arrojadas por las regresiones se les aplicó la derivada para obtener la velocidad de secado, la cual se graficó versus la humedad libre para cada tipo de muestra. Los resultados numéricos para cada una de las muestras se reportan en el apéndice C.

3.5 ELABORACIÓN DE BALANCES DE MASA Y DE ENERGÍA EN EL SECADOR DE MINERAL DE HIERRO MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO.

3.5.1 Balance de masa

El cálculo inicial para realizar el balance de masa es convertir los flujos normales a flujos reales, como se muestra:

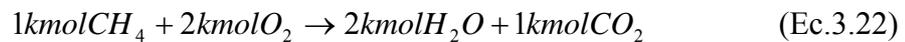
$$Fr_i = \frac{Fn_i}{22,4 \text{ mol} / L} \quad (\text{Ec.3.21})$$

Siendo:

Fr_i : flujo real (kmol/h).

Fn_i : flujo normal (Nm^3/h).

Para realizar el balance en la cámara de combustión es necesario determinar las posibles reacciones de combustión.



Para conocer la cantidad de oxígeno disponible en el aire para llevar a cabo las reacciones de combustión, se realizó el siguiente cálculo:

$$n_{O_2 \text{ DISPONIBLE}} = \left(\frac{0,21 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol aire}} \right) \cdot Fr_{AC} \quad (\text{Ec.3.30})$$

Siendo:

n_{O_2} : kilomol de oxígeno (kmol/h).

Fr_{AC} : flujo real de aire disponible para la combustión (kmol/h).

Fr_{AF} : flujo real de aire disponible para la fluidización (kmol/h).

Basándose en la estequiométrica hay que determinar cuánto se necesita de aire para llevar a cabo las reacciones, así como también las cantidades de los productos de combustión (H_2O y CO_2) que se generan a partir del gas natural

alimentado y la composición del mismo (tabla B.5). Numéricamente, para los moles de oxígeno requeridos para la combustión (nO_2):

$$nO_2 \text{ REQUERIDO} = \left(\frac{2 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } CH_4} \right) \cdot \left((Fr_{GN} \cdot y_{CH_4} GN) + (Fr_{LD} \cdot y_{CH_4} LD) \right) \quad (\text{Ec.3.31})$$

Donde:

Fr_{GN} : flujo real del gas natural (kmol/h).

Fr_{LD} : flujo real del gas de bajada (kmol/h).

y_{CH_4GN} : composición del metano presente en el gas natural.

y_{CH_4LD} : composición del metano presente en el gas de bajada.

Se repite el cálculo anterior para todos los componentes presentes en el gas natural, así como también los que se generan (H_2O y CO_2) y se realiza una sumatoria, para cada componente, del aporte de cada reacción. Es importante destacar que el aire se encuentra en exceso para garantizar una combustión completa. Para calcular el oxígeno en exceso se utilizó la siguiente ecuación:

$$\%O_2 \text{ exceso} = \left(\frac{O_2 \text{ DISPONBLE} - O_2 \text{ REQUERIDO}}{O_2 \text{ REQUERIDO}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Ec.3.32})$$

Los kilomol resultantes con la ecuación 3.34 son necesarios convertirlos a kilogramos (kg) mediante en peso molecular (tabla A.6), como se muestra:

$$mO_2 = nO_2 \cdot PMO_2 \quad (\text{Ec.3.33})$$

Donde:

mO_2 : kilogramos de oxígeno (kg/h).

PMO_2 : peso molecular del oxígeno (kg/kmol).

El cálculo anterior se repite para todos los compuestos y elementos presentes en la mezcla de gases para fluidizar. Luego se suman los resultados excluyendo al agua para conocer la cantidad de gas seco.

$$Gs = mCO_2 + mO_2 + mN_2 \quad (\text{Ec.3.34})$$

Siendo:

Gs: masa de gas seco (kg/h).

mCO₂: masa de dióxido de carbono (kg/h).

mO₂: masa de oxígeno (kg/h).

mN₂: masa de nitrógeno (kg/h).

Posteriormente se conoce la fracción de los componentes de la mezcla gaseosa utilizada para fluidizar, como sigue:

$$y_i = \frac{n_i}{n_{total}} \quad (\text{Ec.3.35})$$

Donde:

y_i: fracción de cada componente presente en la mezcla.

n_i: cantidad másica de cada componente presente en la mezcla (kg/h).

n_{total}: número de moles totales (kg/h).

A lo largo del recorrido de la mezcla gaseosa a través del secador, las cantidades de los gases (H₂O, CO₂ y O₂) se mantienen constantes; la cantidad de agua varía debido a la masa de agua que se le retira al mineral y esta es ganada por la mezcla gaseosa. El balance se realiza en base seca porque no se disponen de datos suficientes. La conversión se realiza como se muestra:

$$Y_1 = \frac{y_{H_2O}}{(1 - y_{H_2O})} \quad (\text{Ec.3.36})$$

Donde:

Y₁: fracción de agua base seca (kg agua/kg ss).

y_{H₂O}: fracción másica de agua.

3.5.2 Prueba para estimar el arrastre de ultrafinos

Previo a realizar el balance de masa se realizó un estudio para estimar el arrastre de sólidos ultrafinos, los ultrafinos (UF) son almacenados y devueltos a CVG Ferrominera. El estudio consistió en cerrar una válvula del tanque de

almacenamiento por períodos de 15 minutos para estimar cuánto se descargaba de ultrafinos. Una vez conocida la descarga para 15 minutos, se realizó el cálculo para una hora y se repitió la experiencia para tener valores mas acertados. El valor arrojado fue de 30 % de arrastre aproximadamente y se confirmó con un estudio realizado, que evaluó el funcionamiento de los secadores en la planta [15]. También se supone que los finos arrastrados fuera del secador están en equilibrio con el sólido seco descargado, es decir tienen la misma humedad.

A partir de este cálculo se realiza el balance de humedad en base seca como se muestra a continuación:

$$S_H \cdot (1 - x_1) \cdot X_1 + G_S \cdot Y_1 = G_S \cdot Y_2 + S_S \cdot (1 - x_2) \cdot X_2 + UF \cdot (1 - x_2) \cdot X_2 \quad (\text{Ec.3.37})$$

Siendo:

S_H : cantidad de mineral de hierro húmedo a la entrada del secador (kg/h).

x_1 : fracción de agua presente en el mineral alimentado.

X_1 : fracción de agua base seca presente en el mineral alimentado (kg agua/kg ss).

Y_1 : fracción de agua base seca a la entrada de la mezcla de gases en el secador (kg agua/kg gs).

Y_2 : fracción de agua base seca por el tope del secador presente en el gas (kg agua/kg gs).

S_S : cantidad de mineral seco a la descarga del secador (kg/h).

x_2 : fracción de agua presente en el mineral a la descarga del secador.

X_2 : fracción de agua base seca presente en el mineral, a la descarga del secador (kg agua/kg ss).

UF: cantidad de ultrafinos arrastrados por el tope del secador.

De la ecuación anterior se despeja Y_2 , es decir, la humedad del gas a la salida del secador. Los datos necesarios (mineral descargado, humedad de entrada y salida del mineral) para la obtención de este cálculo fueron proporcionados por la empresa Orinoco Iron. Una vez determinada la humedad se pueden conocer la cantidad másica de las demás corrientes y la composición de los mismos. Los resultados se muestran en la figura 4.11.

3.5.3 Balance de energía en la cámara de combustión

Previo a realizar algún cálculo respecto al balance de energía, es necesario establecer un sistema de referencia, ($T_{\text{ref}} = 25^{\circ}\text{C}$ y $P_{\text{ref}} = 1 \text{ atm}$).

El balance general de energía se puede escribir como sigue:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta P + \Delta K = Q + W \quad (\text{Ec.3.38})$$

Donde:

ΔE : variación de energía.

ΔU : energía interna.

ΔP : energía potencial.

ΔK : energía cinética.

Q : calor.

W : trabajo.

Todos los anteriores tipos de energía tienen unidades de J/kg.

En este sistema, los términos ΔE , ΔP , ΔK y W son cero. Por lo tanto, el balance de energía se reduce a $Q = \Delta H$.

Donde:

$$\Delta H = \Delta H_{\text{PRODUCTOS}} - \Delta H_{\text{REACTIVOS}} \quad (\text{Ec.3.39})$$

Siendo:

ΔH : entalpía (Kj/kg).

El gradiente de entalpía se calcula mediante la ecuación 2.23, donde T_1 corresponde a la temperatura de referencia y T_2 a la temperatura del sistema reportada en la tabla B.9. A su vez la ecuación 2.23 incluye la capacidad calorífica que se calcula siguiendo la ecuación 2.24. Las constantes para cada componente se reportan en las tablas A.3, A.4 y A.5. Se realiza el cálculo de entalpía para cada reacción que interviene en el sistema.

Balance de energía en la cámara de combustión

- Considerar todas las posibles reacciones de combustión que puedan tener lugar en la cámara.
- Calcular las entalpías correspondientes con cada especie involucrada en cada reacción.
- Realizar la sumatoria de las entalpías tanto para los reactantes como para los productos y posteriormente aplicar la ecuación.

Balance de energía en el secador

- Calcular los Cp para cada especie involucrada en el secador, es decir, los Cp para el Fe₂O₃ y para el H₂O, para el sólido alimentado, el de salida y el arrastrado por el gas; así como también los Cp para las especies de la mezcla gaseosa (H₂O, O₂, N₂ y CO₂) tanto para el gas de entrada como para el de salida siguiendo la ecuación 2.24.
- Calcular el Cp promedio para el gas seco, siguiendo la ecuación:

$$\overline{Cp}_{GS} = \frac{(yCO_2 \cdot Cp_{CO_2}) + (yO_2 \cdot Cp_{O_2}) + (yN_2 \cdot Cp_{N_2})}{(1 - yH_2O) \cdot \overline{PM}_{GS}} \quad (\text{Ec.3.40})$$

Donde:

\overline{Cp}_{GS} : capacidad calorífica promedio del gas seco (Kj/kmol.K).

yCO₂: fracción molar de dióxido de carbono.

yO₂: fracción molar de oxígeno.

yN₂: fracción molar de nitrógeno.

yH₂O: fracción molar de agua.

\overline{PM}_{GS} : peso molecular promedio de gas seco (kg/kmol).

Donde a su vez en la ecuación anterior se necesita el peso molecular promedio del gas seco, se calcula como se muestra a continuación:

$$\overline{PM}_{GS} = \frac{(y_{CO_2} \cdot PM_{CO_2}) + (y_{O_2} \cdot PM_{O_2}) + (y_{N_2} \cdot PM_{N_2})}{1 - y_{H_2O}} \quad (\text{Ec.3.41})$$

c) Se determinan las entalpías del gas de entrada y de salida en base al sólido seco, mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta H_{GS} = [\overline{Cp}_{GS} + (Cp_{H_2O} \cdot Yi)] \cdot Ti + (\lambda_{H_2O} \cdot Yi) \quad (\text{Ec.3.42})$$

Siendo:

ΔH_{GS} : entalpía para el gas seco (kg agua/kg gs).

Cp_{H_2O} : capacidad calorífica del vapor de agua (Kj/kg).

λ_{H_2O} : calor latente de vaporización (Kj/kg).

T_i : temperatura para ese flujo (°C o K).

Y_i : fracción base seca de agua para el gas (kg agua/kg ss).

d) Las entalpías para el sólido alimentado, el de salida y el arrastrado, se conocen mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta H_{SOLIDO} = Cp_{SS} \cdot T_i + X_i \cdot Cp_{H_2O} \cdot T_i \quad (\text{Ec.3.43})$$

Siendo:

Cp_{SS} : capacidad calorífica para los sólidos alimentados, descargados y de arrastrados por el secador (Kj/kmol.K).

Cp_{H_2O} : capacidad calorífica para el agua líquida (Kj/kmol.K).

X_i : fracción base seca de agua para el sólido (kg agua/kg ss).

3.5.4 Hoja de cálculo

La hoja de cálculo es una herramienta computacional presentada en Microsoft Excel y basada en VISUAL BASIC, que permite simular las condiciones operativas para determinadas condiciones, de un secador de lecho fluidizado presente en Orinoco Iron, así como también predecir variables del sistema tales como: cantidad de mineral alimentado al secador, flujo másico de la mezcla gaseosa de entrada y salida por el tope del secador, y la composición de

dicha mezcla, donde destaca el valor de la humedad de salida. Para el balance de energía se puede predecir: la capacidad calorífica por especie involucrada en los flujos másicos, los cambios de energía para cada sistema bien sea suministrada o absorbida, en la cámara de combustión y en el secador.

a. Ventana de presentación

Como lo muestra la figura 3.1, esta ventana permite al usuario conocer el título del la hoja de calculo que visita y el autor que la diseño, para familiarizarse con el tema y tener conocimiento sobre el área estudiada. Con tan solo pulsar sobre el botón ingresar el usuario podrá acceder al simulador

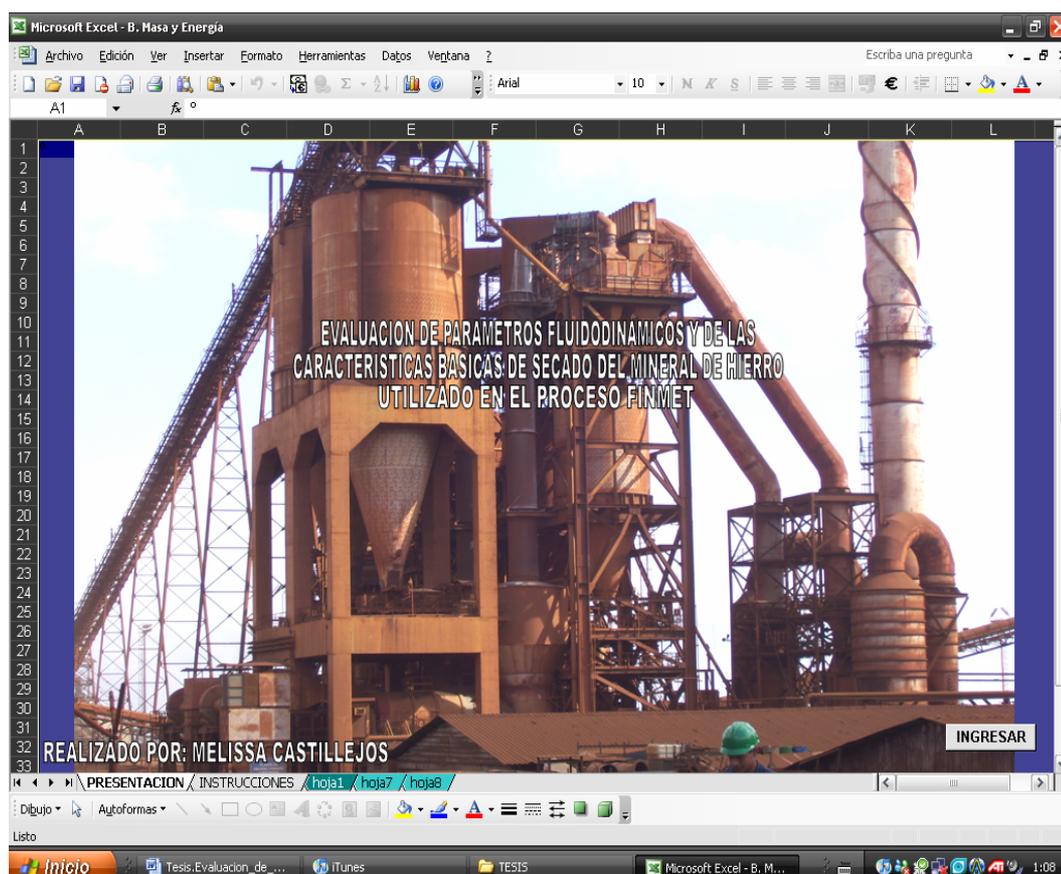


Figura 3.1: Ventana de presentación de la hoja de cálculo.

b. Ventana de instrucciones y observaciones

En esta ventana (figura 3.2) se instruye al usuario sobre el uso de la hoja de cálculo, también presenta observaciones específicas sobre suposiciones aplicadas en la hoja, así como también las limitantes de la misma. La ventana de instrucciones y observaciones también ofrece al usuario un listado sobre la simbología utilizada a lo largo de la hoja, de manera de evitar dudas y confusiones.

c. Ventana de datos

En esta ventana el usuario tiene que ingresar los datos en las casillas vacías, una vez tomada en cuenta la ventana de instrucciones y observaciones (ver figura 3.3). En caso de estar llenas las casillas puede vaciarlas tan solo con pulsar el botón limpiar. Para continuar trabajando en la hoja basta con pulsar sobre la flecha en rojo. Los datos frecuentemente son suministrados por el personal que opera en la Sala de Control de Orinoco Iron y por el sistema IBH que se maneja dentro de la empresa.

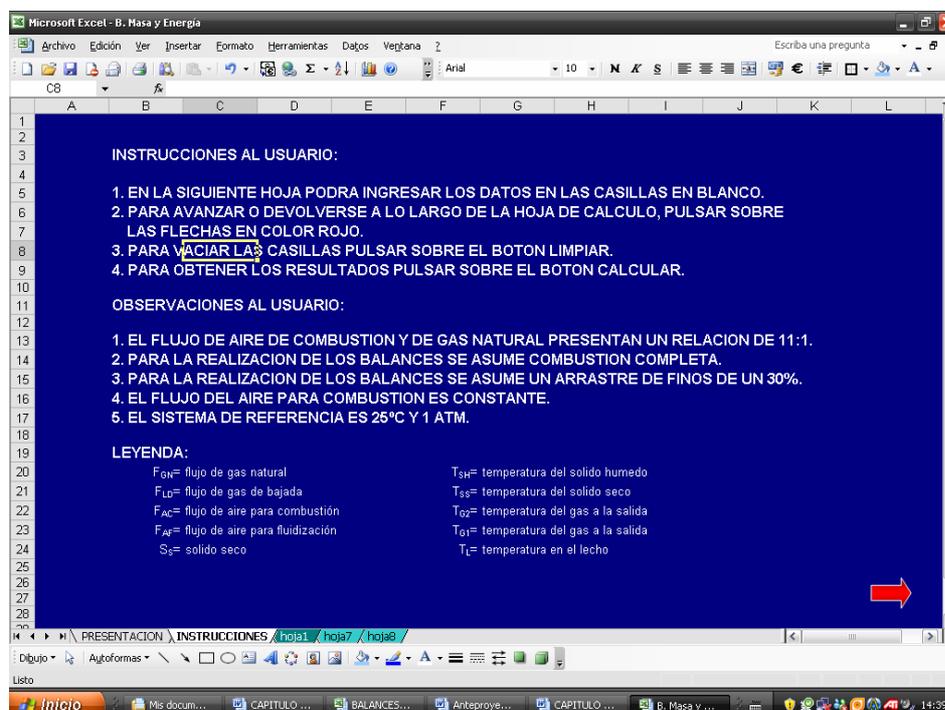


Figura 3.2: Ventana de instrucciones y observaciones.

d. Ventana de resultados de balance de masa

En esta ventana no es necesario ingresar datos. La primera ventana de resultados arroja los valores de flujos (kmol/h), flujos másicos de cada componente (kg/h) y composición de los mismos expresada en fracción y porcentaje. Así como también la carga y descarga de mineral de hierro del secador (kg/h). Además contiene dos botones, uno para limpiar las casillas y el otro para realizar los cálculos. Como se muestra en la figura 3.4.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data entry sections:

- FLUJOS NORMALES:**
 - F_{GN} = m³n/h
 - F_{LD} = m³n/h
 - F_{AC} = m³n/h
 - S_S = ton/h
 - F_{AF} = 130000 m³n/h
- PRESION DEL LECHO:**
 - P_{manom} = mbarg
- TEMPERATURAS BAJO PARRILLA:**
 - T_1 (°C) =
 - T_2 (°C) =
- TEMPERATURAS (°C):**
 - T_{SH} =
 - T_{SS} =
 - T_{G2} =
 - T_L =
- DATA DE GAS NATURAL:**
 - CH4 = %
 - C2H6 =
 - C3H8 =
 - C4H10 =
 - C5H12 =
 - C6H14 =
 - CO =
 - CO2 =
- DATA DE LET DOWN GAS:**
 - CH4 = %
 - C2H6 =
 - C3H8 =
 - C4H10 =
 - C5H12 =
 - C6H14 =
 - CO =
 - CO2 =
 - H2 =
 - H2O =
 - N2 =
- Humidity:**
 - %HUMEDAD ENTRADA MINERAL
 - %HUMEDAD SALIDA DEL MINERAL
- Buttons:** A 'LIMPIAR' button with a red arrow pointing right.

Figura 3.3: Ventana para ingresar datos.

e. Ventana de resultados del balance de energía

En la ventana, que se observa en la figura 3.5, se muestran los resultados arrojados por el balance de energía, tales como la capacidad calorífica (J/gmol) de cada componente, la entalpía (Kj/kg ss) de la corriente gaseosa a la entrada y salida del secador. También se pueden observar las diferentes temperaturas a lo largo del sistema.

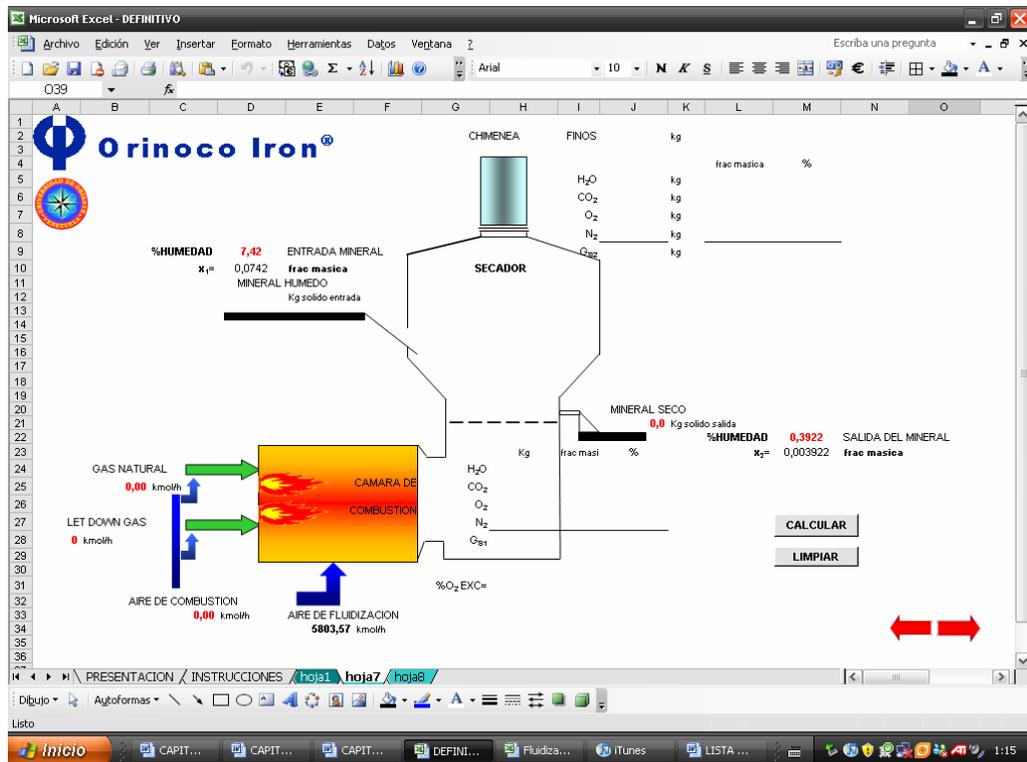


Figura 3.4: Ventana de resultados del balance de masa.

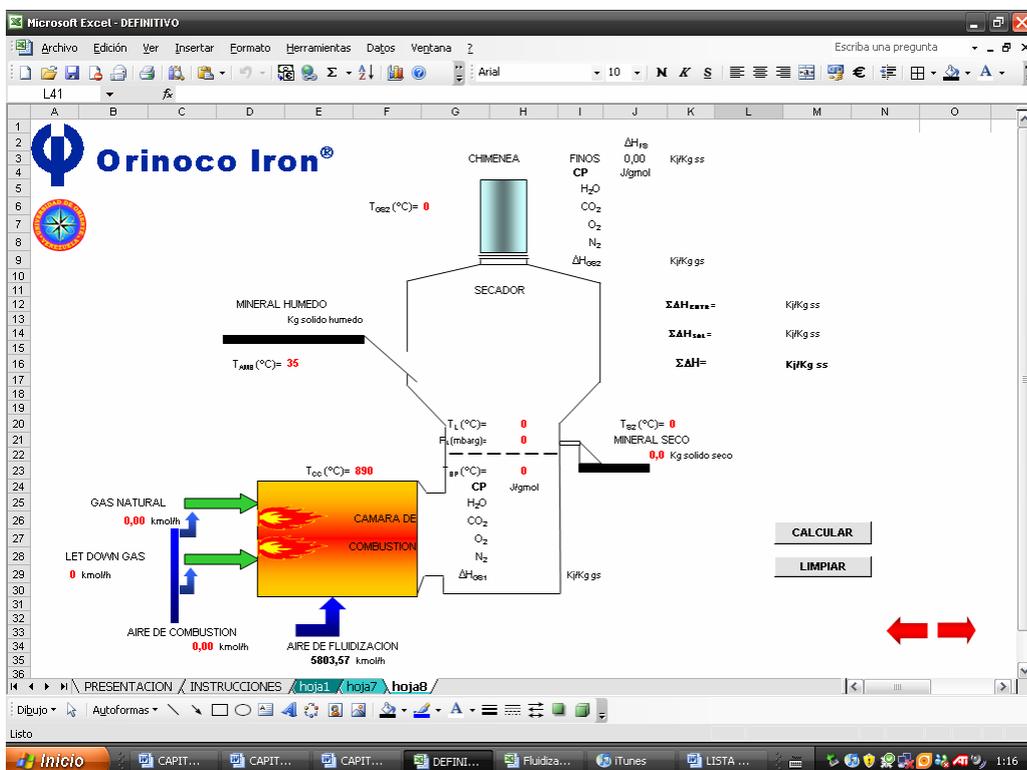


Figura 3.5: Ventana de resultados del balance de energía.

3.6 MUESTRA DE CÁLCULO

Para realizar los cálculos se utilizaron datos recopilados en los secadores de lecho fluidizado para una capacidad máxima.

3.6.1 Cálculo de la distribución del tamaño, densidad a granel, porosidad, densidad aparente, composición química y diámetro promedio de las partículas (base área y base volumen).

- Cálculo del porcentaje retenido en cada tamiz.

Una vez realizada la operación de tamizado. Con la ecuación 3.1 se sustituyen los valores tomados de la tabla 4.1 y se obtiene:

$$\%retenido = \left(\frac{17,72}{940,81} \right) \cdot 100 = 1,88\%$$

El cálculo se repite para todos los pesos retenidos correspondientes a cada tamiz. Los demás resultados se muestran en la tabla B.1.

- Cálculo de diámetros promedios entre dos tamices consecutivos.

El cálculo de diámetro promedio para un par de tamices consecutivos en una batería se realiza utilizando la ecuación 3.2, como se muestra a continuación:

$$\overline{dp} = \frac{12700 + 9525}{2} = 11112,5 \mu\text{m}$$

Los resultados obtenidos para el resto de los pares de tamices se muestran en la tabla B.1.

- Cálculo de la densidad a granel.

El procedimiento 3.1.2 establecido para la densidad a granel, se le realizó a la muestra original, los resultados de la experiencia fueron:

Lectura mayor del cilindro graduado = 51 ml.

Lectura menor del cilindro graduado = 54 ml.

$$\bar{L} = \frac{(51 + 54)ml}{2} = 52,5ml$$

Siendo:

\bar{L} : promedio entre la lectura mayor y menor registrada por cilindro graduado.

Peso del mineral = 103,2629 g.

$$\rho_{GRANEL} = \frac{103,2629g}{52,5ml} = 1,9669g/ml = 1966,9kg/m^3$$

- Diámetros promedios base área y base volumen.

Para el cálculo de diámetro promedio base área, el porcentaje retenido se lleva a fracción utilizando la ecuación 3.3, como se muestra a continuación:

$$x_i = \frac{1,88}{100} = 0,0188$$

Para el diámetro promedio base área se utiliza la ecuación 3.4, y con la sumatoria de los diámetros promedios (\bar{dp}) calculado como se mostró anteriormente se tiene:

$$dp_A = \frac{1}{(1,48 + 4,09)10^{-6} + (1,20 + 2,59 + 3,01 + 5,56)10^{-5} + (4,30 + 5,63)10^{-4} + 2,59 \cdot 10^{-3}}$$

$$dp_A = \frac{1}{3,71 \cdot 10^{-3}} = 269,1\mu m$$

Para el diámetro promedio base volumen se utilizó la ecuación 3.5, los valores se toman de la tabla B.1, el cálculo se realiza como sigue:

$$\begin{aligned} dp_V &= (12700 \cdot 0,0188) + (11112,5 \cdot 0,0455) + (7937,5 \cdot 0,0950) + \dots \\ &\dots + (4838,5 \cdot 0,1253) + (2489 \cdot 0,0749) + (1321 \cdot 0,0734) + \dots \\ &\dots + (618,5 \cdot 0,2657) + (196,5 \cdot 0,1106) + (0,191 \cdot 73,5) \end{aligned}$$

$$dp_v = 2588,68 \mu\text{m}.$$

Los resultados de la densidad a granel, diámetro promedio base área y volumen se muestran en la tabla 4.2.

3.6.2 Cálculo de la densidad y viscosidad a la temperatura y presión del lecho.

Para el cálculo de la densidad se siguió la ecuación 3.6, los valores de temperatura y presión del lecho se muestran en la tabla B.2, numéricamente:

$$\rho_{CO_2} = 44\text{kg} / \text{kmol} \cdot \frac{1,4935\text{atm}}{0,08206\text{atm} \cdot \text{m}^3 / \text{kmol} \cdot \text{K} \cdot 308,15\text{K}} = 2,5989\text{kg} / \text{m}^3$$

Los resultados de las demás densidades de los gases de fluidización se muestran en la tabla B.3.

Para el cálculo de la densidad de la mezcla se aplica la ecuación 3.7, como sigue:

$$\rho_{mezcla} = (1,0632 \cdot 0,0154) + (1,6538 \cdot 0,9611) + (1,8901 \cdot 0,0020) + (2,5989 \cdot 0,0214)$$

$$\rho_{mezcla} = 1,6654 \text{ kg/m}^3$$

La viscosidad se obtuvo utilizando la figura A.1, los resultados se reportan en la tabla B.3. Luego se calculó la viscosidad para la mezcla gaseosa siguiendo la ecuación 3.8:

$$\mu_{mezcla} = (0,0000137 \cdot 0,0154) + (0,0000209 \cdot 0,9611) \dots + \dots + (0,0000240 \cdot 0,0020) + (0,0000179 \cdot 0,0214)$$

$$\mu_{mezcla} = 0,0000207 \text{ kg/m.s}$$

Los resultados de la densidad y viscosidad son reportados en la tabla 4.4.

3.6.3 Cálculo de la velocidad superficial del gas de fluidización.

La velocidad en Orinoco Iron es reportada en términos de flujo normal volumétrico; la ecuación 3.9 permite el cambio a flujo a condiciones reales de operación, como se muestra a continuación:

$$V_o = 130000 Nm^3 / h \frac{1,013bar}{1,0131bar} \cdot \frac{389,15K}{273,15K} = 185189,48m^3 / h$$

Luego este flujo volumétrico real es llevado a velocidad mediante la ecuación 3.10, como sigue:

$$U_o = \frac{185189,48m^3 / h}{3,1416 / 4 \cdot (3,376m)^2} = 5,7467m / s$$

3.6.4 Determinación de la velocidad mínima de fluidización y terminal de las partículas), y de las características del lecho fluidizado (clasificación de partículas según Geldart y régimen de fluidización).

- Velocidad mínima de fluidización.

La velocidad mínima se calcula utilizando las ecuaciones 2.13 o 2.14 dependiendo del número adimensional de Arquímedes, para valores menores a 10^3 se utiliza la ecuación 2.13, y para valores mayores a 10^7 se utiliza la ecuación 2.14. El número de Arquímedes se obtiene de la ecuación 2.7:

$$Ar = \frac{(0,0111125m)^3 \cdot 9,81m / s^2 \cdot 1,6654kg / m^3 \cdot (3375 - 1,6654)kg / m^3}{(0,0000207kg / m \cdot s)^2} = 1,76 \cdot 10^8$$

El número de Arquímedes resultó mayor a 10^7 , la ecuación que se debe utilizar es la 2.14, numéricamente se tiene:

$$u_{mf} = 0,202 \sqrt{\frac{(3375 - 1,6654) \text{kg} / \text{m}^3 \cdot 9,81 \text{m} / \text{s}^2 \cdot 0,0111125 \text{m}}{1,6654 \text{kg} / \text{m}^3}} = 3,0016 \text{m} / \text{s}$$

Los resultados de los números de Arquímedes y de velocidad mínima para cada diámetro promedio se tienen en la tabla B.4.

- Velocidad terminal

El cálculo de la velocidad terminal es posible utilizando dos parámetros adimensionales (u^* y dp^*) utilizando las ecuaciones 2.19 y 2.20 respectivamente, como se muestra a continuación:

$$dp^* = 0,0111125 \mu\text{m} \cdot \left[\frac{1,6654 \text{kg} / \text{m}^3 (3375 - 1,6654) \text{kg} / \text{m}^3 \cdot 9,81 \text{m} / \text{s}^2}{0,0000207 \text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}} \right]^{1/3} = 560,38$$

$$u^* = \left[\frac{18}{(560,38 \mu\text{m})^2} + \frac{2,335 - (1,744 \cdot 0,92)}{(560,38 \mu\text{m})^{0,5}} \right]^{-1} = 32,34$$

$$u_t = 32,34 \cdot \left[\frac{(1,6654 \text{kg} / \text{m}^3)^2}{0,0000207 \text{kg} / \text{m} \cdot \text{s} \cdot (3375 - 1,6654) \text{kg} / \text{m}^3 \cdot 9,81 \text{m} / \text{s}^2} \right]^{1/3} = 20,30 \text{m} / \text{s}$$

Los resultados de la velocidad terminal a diferentes diámetros promedios se muestran en la tabla B.5.

- Clasificación de partículas estándar según Geldart.

Los parámetros necesarios para entrar a la gráfica diseñada por Geldart son: la diferencia entre la densidad aparente de la partícula y la del gas ($\rho^* = \rho - \rho_g$), y el diámetro promedio base área, calculado anteriormente usando la ecuación 3.4, numéricamente se tiene:

$$\rho^* = (3375 - 1,6654) \text{kg} / \text{m}^3 = 3373,33 \text{kg} / \text{m}^3$$

- Régimen de fluidización.

Los parámetros adimensionales (dp^* y u^*) son los mismos utilizados para los cálculos de velocidad terminal (ecuación 2.19 y 2.20), pero para el valor de diámetro promedio se utiliza el base área, que es el representativo de la mezcla de partículas alimentadas al secador. Los cálculos se muestran a continuación:

$$dp^* = 0,0002691 \mu m \cdot \left[\frac{1,6654 kg / m^3 (3375 - 1,6654) kg / m^3 \cdot 9,81 m / s^2}{0,0000207 kg / m \cdot s} \right]^{1/3} = 13,57$$

$$u_r^* = \left[\frac{18}{(13,57 \mu m)^2} + \frac{2,335 - 1,744 \cdot 0,92}{(13,57 \mu m)^{0,5}} \right]^{-1} = 3,38$$

3.6.5 Cálculos para realizar las curvas de velocidad de deshidratación, en función de los contenidos de humedad libre en los sólidos.

- Método de la estufa

Aplicando el método de la estufa encontrado en la sección 3.4.4, los resultados para la corrida de 6 *mesh* se presentan a continuación, inicialmente se sustituyen los valores en la ecuación 3.22, como se muestra a continuación:

$$X_{6mesh} = \frac{(16,3989 - 14,3449)g}{(16,2744 - 14,3449)g} - 1 = 0,0645$$

Despejando de la ecuación 3.21 la masa de sólido totalmente seco, se tiene:

$$m_{STS} = \frac{20,1609g}{(1 + 0,0645)} = 18,94g$$

- Determinación de la pérdida de humedad mediante la balanza Ohaus.

A la muestra de 6 *mesh* se le realizó un duplicado. El paso inicial es promediar las humedades conocidas de ambas corridas, para un tiempo uno (1) se tiene:

$$\% \bar{H} = \frac{0,30 + 0,10}{2} = 0,20$$

Mediante la sustitución en la ecuación 3.23, obtiene la masa parcialmente seca para cada tiempo, como se muestra a continuación:

$$m_{SS_T} = \frac{(100 - 0,20) \cdot 20,1609 g}{100} = 20,1205 g$$

Para conocer la cantidad de agua que permanece en el mineral a medida que transcurre el tiempo se aplica la ecuación 3.24, como se muestra:

$$m_{H_2O_R} = (20,1205 - 18,8600) g = 1,2605 g$$

Una vez conocida la cantidad de agua se divide entre el total del mineral parcialmente seco y se obtiene la humedad en base seca para ese determinado tiempo (1 minuto):

$$X_{BS} = \frac{1,2605}{20,1205} = 0,0626$$

Finalmente se calcula la humedad libre según la ecuación 3.26. La humedad de equilibrio es el último valor de humedad base seca cuando cesa la operación de secado, numéricamente se tiene:

$$X_L = 0,0626 - 0,0027 = 0,0599$$

Los cálculos se repiten para cada muestra de mineral de hierro (10, 16, -16 mesh y la muestra original).

Los resultados de las regresiones lineales y no lineales para cada muestra se encuentran en los anexos C.

3.6.6 Elaboración de balances de masa en el secador de mineral de hierro mediante lecho fluidizado.

El cálculo inicial es convertir los flujos normales a reales con la ecuación 3.24, como se muestra a continuación:

$$Fr_{GN} = \frac{2592 Nm^3 / h}{22,4 mol / L} = 115,71 kmol/h$$

Los resultados de los demás flujos se encuentran en la figura 4.11.

- Moles de oxígeno disponibles para combustión.

Para conocer la cantidad de oxígeno presente para llevar a cabo las reacciones de combustión posibles se realiza el siguiente cálculo:

$$nO_2 \text{ DISPONIBLE} = \left(\frac{0,21 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol aire}} \right) \cdot (1275,54) \text{ kmol} / h = 267,8625 \text{ kmol} / h$$

- Moles de oxígeno requeridos.

Para obtener el número de moles por componente presente en el gas natural es necesario conocer cada una de las posibles reacciones de combustión, balancearlas y con la estequiométrica calcular cuanto de vapor de agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂) produce cada una y cuanto de oxígeno (O₂) consume, para obtener la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar el combustible presente en cada reacción, se utiliza la ecuación 3.33:

$$nO_2 \text{ REQUERIDO} = \left(\frac{2 \text{ kgmol } O_2}{1 \text{ kgmol } CH_4} \right) \cdot (115,71 \text{ kmol} / h \cdot 0,8240) = 190,6971 \text{ mol} / h$$

Análogamente se realizan los cálculos para el vapor de agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂), basado en la estequiométrica de cada reacción posible. Los resultados se muestran en la tabla B.7.

- Porcentaje de oxígeno en exceso.

El aire se encuentra en exceso para garantizar combustión completa.

$$\%O_2 \text{ exceso} = \left(\frac{(267,8625 - 236,1555) \text{ kmol}}{236,1555 \text{ kmol}} \right) \cdot 100 = 13,43\%$$

- Convertir los kilomol de vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) y oxígeno (O₂) a kilogramos.

El primer paso es realizar la sumatoria de las cantidades de H₂O, CO₂ y O₂ que aporta cada flujo, por ejemplo el oxígeno presente en la mezcla es el proveniente del aire para fluidización más el que se encuentra en exceso; el dióxido de carbono sería la suma del CO₂ presente en el gas natural mas el que se produce por efecto de la combustión; el agua es la suma de la que se produce totalmente

por combustión y la que se encuentra en forma de vapor de agua en el aire. Un elemento presente en el gas natural y en el aire es nitrógeno (N_2), el cual no reacciona ni se produce participa como un inerte, la cantidad total de N_2 se conoce con la suma de la cantidad presente en el aire y en el gas natural.

La conversión de kilomol a kilogramos requiere usar el peso molecular de cada compuesto (H_2O , CO_2 y O_2), mostrados en la tabla A.6, una vez conocidos los moles totales de cada compuesto y elemento presente en la mezcla de gases, como se muestra a continuación:

$$m_{O_2} = 1250,457 \text{ kmol} / h \cdot \frac{32 \text{ kg}}{\text{kmol}} = 40014,624 \text{ kg} / h$$

Los resultados se muestran en la tabla B.8.

- Calcular la cantidad de gas seco.

Posteriormente se calcula el gas seco con la ecuación 3.37, donde se realiza la sumatoria de las cantidades másicas de cada compuesto y elemento, excluyendo el agua, numéricamente:

$$G_s = (40014,624 + 6470,697 + 156589,850) \text{ kg} / h = 203075,170 \text{ kg} / h$$

- Calcular la fracción de cada compuesto y elemento a la entrada del secador.

La fracción de agua en la mezcla gaseosa a la entrada del secador se conoce como el cociente de la masa de agua entre la masa total de la mezcla, siguiendo la ecuación 3.38:

$$y_{H_2O} = \frac{9674,038 \text{ kg} / h}{(40014,624 + 6470,697 + 156589,850 + 9674,038) \text{ kg} / h} = 0,0455$$

Y así se realiza el cálculo para cada uno de los componentes de la mezcla. Los resultados se muestran en la tabla B.8.

- Convertir la fracción másica húmeda en fracción en base seca.

La conversión a base seca se realiza utilizando la ecuación 3.39 como se muestra:

$$Y_1 = \frac{0,0455}{(1 - 0,0455)} = 0,0476 \text{ kg agua / kg gs}$$

- Cálculo de la fracción de agua en la mezcla gaseosa a la salida del secador a partir del balance de masa.

Para este cálculo se fue necesario realizar una prueba para conocer la cantidad de finos que se arrastra fuera del secador, como lo explica la sección 3.5.2. El balance de masa se realiza con un arrastre aproximadamente de 30 %, sustituyendo los valores en la ecuación 3.40, se tiene:

$$\begin{aligned} &405714,3 \text{ kg / h} \cdot (1 - 0,0742) \cdot 0,0801 \text{ kg agua / kg ss} + \dots \\ &+ 203075,17 \text{ kg / h} \cdot 0,0476 \text{ kg agua / kg gs} = 203075,17 \text{ kg / h} \cdot Y_2 + \dots \\ &\dots + 284000 \text{ kg / h} \cdot (1 - 0,0039) \cdot 0,0039 \text{ kg agua / kg ss} + \dots \\ &\dots + 121714,3 \text{ kg / h} \cdot (1 - 0,0039) \cdot 0,0039 \text{ kg agua / kg ss} \end{aligned}$$

Rearreglando la ecuación anterior, se despeja Y_2 y así finalmente conocer la humedad base seca del gas por el tope.

$$Y_2 = 0,1880 \text{ kg agua / kg gs}$$

Con un despeje básico y sustituyendo en la ecuación 3.39, se tiene que $y_2 = 0,1583$. Todos los resultados del balance de masa se muestran en la figura 4.11.

3.6.7 Balances de energía en la cámara de combustión.

El balance en la cámara (la cual se considera adiabática) incluye las reacciones de combustión, por lo cual se utiliza el calor de combustión (tabla A.7) que tiene cada especie que participa en las reacciones. El calor necesario para calentar el aire de fluidización se conoce con el balance general que se reduce a $Q = \Delta H$, aplicando la ecuación 2.23 con las constantes para la capacidad calorífica tomadas de la tabla A.3, y las temperaturas de la tabla B.9, se tiene:

$$\begin{aligned} \Delta H_{CH_4} &= 34,31(35 - 25) + (5,469 \cdot 10^{-2} / 2) \cdot (35^2 - 25^2) + \dots \\ &\dots + (0,3661 \cdot 10^{-5} / 3) \cdot (35^3 - 25^3) - (11 \cdot 10^{-9} / 4) \cdot (35^4 - 25^4) - (802,6 \cdot 1000) \end{aligned}$$

Las unidades de capacidad calorífica están dadas según la tabla A.3 en J/gmol.°C, las temperaturas en °C y el calor de combustión en Kj/gmol, por lo cual se hace necesaria la conversión a Joules multiplicando por el factor 1000.

$$\Delta H_{CH_4} = -802240,6J / gmol$$

Los resultados se encuentran en la tabla B.10.

La ecuación 2.23 se aplica tantas veces como combustibles estén presentes en el gas natural, así como también para los productos (H₂O y CO₂), para finalmente aplicar la ecuación 3.41 para cada reacción. Los resultados se muestran en las tablas B.11 y B.12.

- Determinar el cambio neto de calor en la cámara de combustión.

De los resultados de las tablas B.11 y B.12 se realiza una sumatoria de las entalpías de entrada y salida a la cámara de combustión para conocer el cambio neto de calor, siguiendo la ecuación 3.41, se tiene:

$$\Delta H_{TOTAL} = (-283387,40 - 16195,24) \text{ Kj/kg}$$

$$\Delta H_{TOTAL} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Kj/kg}$$

3.6.8 Balances de energía en el secador de lecho fluidizado.

El primer paso es el cálculo de la capacidad calorífica del mineral y la mezcla de gases a la entrada y salida del secador. La temperatura se toma de la tabla B.9 en °C o K dependiendo de lo que indique la tabla A.3; aplicando la ecuación 2.24, se tiene:

$$C_{p,CO_2} = 36,11 + (4,233 \cdot 10^{-2} \cdot 308,15) - (2,887 \cdot 10^{-5} \cdot 308,15^2) + (7,464 \cdot 10^{-9} \cdot 308,15^3)$$

$$C_{p,CO_2} = 55,2183J / gmol.K$$

La capacidad calorífica tiene unidades de J/gmol.K. Los resultados se observan en la tabla B.13.

- Cálculo del peso molecular promedio para el gas seco.

Para simplificar los análisis se supone que la composición de los gases se da en fracción molar a menos que se indique específicamente otra cosa [13]. Es necesario conocer las fracciones en kilomol para determinar la cantidad de cada compuesto de la mezcla de gases en base seca, los resultados se muestran en la

tabla B.15, entonces el peso molecular promedio para el gas seco se conoce mediante la ecuación 3.43, numéricamente se muestra a continuación:

$$\overline{PM}_{GS} = \frac{(0,8596kg \text{ CO}_2 + 5,3158kg \text{ O}_2 + 20,8025kg \text{ N}_2)}{(1 - 0,0714)} = 29,0522kg / kmol$$

- Determinar la capacidad calorífica promedio para el gas seco.

La capacidad calorífica promedio para el gas seco se conoce a través de la ecuación 3.42, sustituyendo en la ecuación se tiene:

$$\overline{Cp}_{GS1} = \frac{(0,0195CO_2 \cdot 55,2183_{CO_2}) + (0,1661O_2 \cdot 35,1048_{O_2}) + (0,7429N_2 \cdot 32,8964_{N_2})}{(1 - 0,0743H_2O) \cdot 29,0522kg / kmol}$$

$$\overline{Cp}_{GS1} = 1,1621Kj / kmol.K$$

Los demás valores de las capacidades caloríficas para el gas a la salida y para el vapor de agua a la entrada y salida se reportan en la tabla B.16

- Conocer las entalpías para el gas a la entrada y salida del secador.

Con la ecuación 3.44 se conoce la entalpía para el sólido en base seca, los datos necesarios se toman de la tabla B.16, como se muestra a continuación:

$$\Delta H_{GS1} = [1,1621Kj / kmol.K + (2,3264Kj / kmol.K \cdot 0,0476kg \text{ agua} / kg \text{ ss})] \cdot 75^\circ C + \dots$$

$$\dots + (2502,3Kj / kg \cdot 0,0476kg \text{ agua} / kg \text{ ss}) = 1125,44Kj / kg \text{ ss}$$

Los resultados se reportan en la tabla B.17.

- Determinar las entalpías para los sólidos alimentados, descargados y arrastrados fuera del secador.

Con la ecuación 3.4 se realiza el cálculo para la entalpía de los sólidos, como sigue:

$$\Delta H_{SH} = (0,6601Kj / kg \cdot 35^\circ C) + (0,0801kg \text{ agua} / kg \text{ ss} \cdot 4,187Kj / kg \text{ agua} \cdot K \cdot 35^\circ C)$$

$$\Delta H_{SH} = 34,8488Kj / kg \text{ ss}$$

Los resultados se muestran en la tabla B.17

- Determinar el cambio neto de calor para los sólidos en el secador.

Utilizando la ecuación 3.41 se conoce el calor total utilizado o desprendido por el sistema, una vez calculadas las entalpías de los flujos que entran y salen del secador.

$$\Delta H_{\text{TOTAL}} = (747,9806 - 1160,2862) \text{Kj/kg ss} = -412,3057 \text{ Kj/kg ss}$$

El resultado se reporta en la figura 4.12.

- Calcular la energía necesaria para producir un kilogramo de sólido seco por hora.

Con la entalpía específica y la cantidad de sólido (en base seca) a la entrada del secador, se obtiene la entalpía total que tiene el sólido alimentado, como se muestra:

$$\Delta H_{SH} \cdot S_H \cdot (1 - x_1)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior, se tiene:

$$1160,29 \text{Kj/kg ss} \cdot 405714,3 \text{kg/h} \cdot (1 - 0,0742) = 3,7561 \cdot 10^5 \text{ Kj/h}$$

Para el sólido a la salida del secador, se utiliza la misma ecuación a las condiciones de salida, como se muestra:

$$694,07 \text{Kj/kg ss} \cdot 284000 \text{kg/h} \cdot (1 - 0,003922) = 1,9634 \cdot 10^8 \text{ Kj/h}$$

Con la diferencia entre la entrada y salida del secador, se tiene:

$$3,7561 \cdot 10^5 \text{ Kj/h} - 1,9634 \cdot 10^8 \text{ Kj/h} = -1,5878 \cdot 10^8 \text{ Kj/h}$$

Con el cociente de la entalpía total y el flujo de sólido seco a la descarga, se tiene la entalpía total necesaria para producir un kilogramo de sólido seco por cada hora, como se muestra:

$$\Delta H = \frac{-1,5878 \cdot 10^8 \text{ Kj/h}}{284000 \text{kg prod.seco}} = -559,0845 \text{Kj/kg prod.seco}$$

CAPITULO 4

DISCUSION Y RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de procesados los datos recolectados en la planta de acuerdo a las metodologías y procesos descritos en el capítulo III (desarrollo del trabajo), a continuación se discuten los resultados según los objetivos específicos planteados.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SÓLIDOS DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR DE MINERAL: DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO, DENSIDAD A GRANEL, POROSIDAD, DENSIDAD APARENTE, COMPOSICIÓN QUÍMICA Y DIÁMETRO PROMEDIO DE LAS PARTÍCULAS (BASE ÁREA Y BASE VOLUMEN).

4.1.1 Distribución del tamaño

La distribución de sólidos en la mezcla de mineral de hierro alimentada al secador industrial es dada por su distribución de tamaños del material particulado. La distribución de los tamaños de partículas calculada a partir de los datos de peso o masa retenida de mineral, en una serie de tamices entre las mallas (*mesh*) ½ y - 16 (tabla 4.1), se presenta en términos de los porcentajes máxicos de cada fracción retenida en relación a la masa total, en función del diámetro promedio de las partículas contenidas en esas fracciones (figura 4.1.a). La población de mayor incidencia correspondió al valor de diámetro promedio de 618,5µm, con una masa retenida de 26,57% respecto a la masa total original; seguida de la fracción con diámetro promedio de 73,5µm con una retención másica de 19,07%. Se evidenció una gran cantidad de finos presentes en la muestra mineral, en la que el 56,7% de la masa total correspondió a partículas con tamaños o diámetros promedios inferiores a 618,5µm; incluyendo las partículas con tamaños promedios de 76,5 a 196,5µm (30,13%). Mientras que el resto de la masa de las partículas (43,3%) se

encontraba distribuida en tamaños mayores (diámetros promedios de 1321 a 12700 μm); entre estas fracciones, la más resaltante fue la de diámetro promedio de 4838,5 μm , con un 12,53% de retención másica.

Tabla 4.1: Distribución de tamaños de partículas.

MALLAS	PESO RETENIDO (g)
1/2	17,72
3/8	42,77
1/4	89,42
6	117,91
10	70,45
16	69,10
60	249,99
100	104,04
-100	179,41

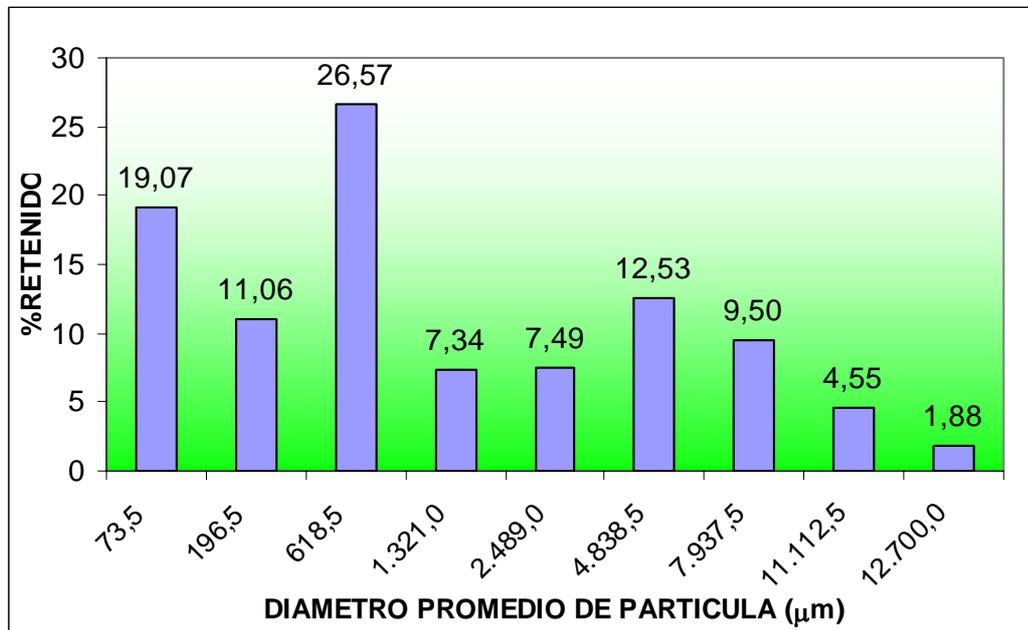
Por otra parte, la figura 4.1.b exhibe el porcentaje másico acumulado en función del diámetro promedio de las partículas, hasta la totalidad (100%) de la muestra. Se puede observar que los mayores incrementos porcentuales de las masas de los sólidos acumulados (hasta 56,7%) respecto al aumento del diámetro promedio del material particulado, lo aportan los finos (73,5-618,5 μm); en contraste con el material más grueso correspondiente a los tamices de aberturas más grandes (1321-12700 μm), con incrementos porcentuales másicos más pequeños.

4.1.2 Densidad a granel, porosidad, densidad aparente, composición química y diámetro promedio de partículas (base área y base volumen)

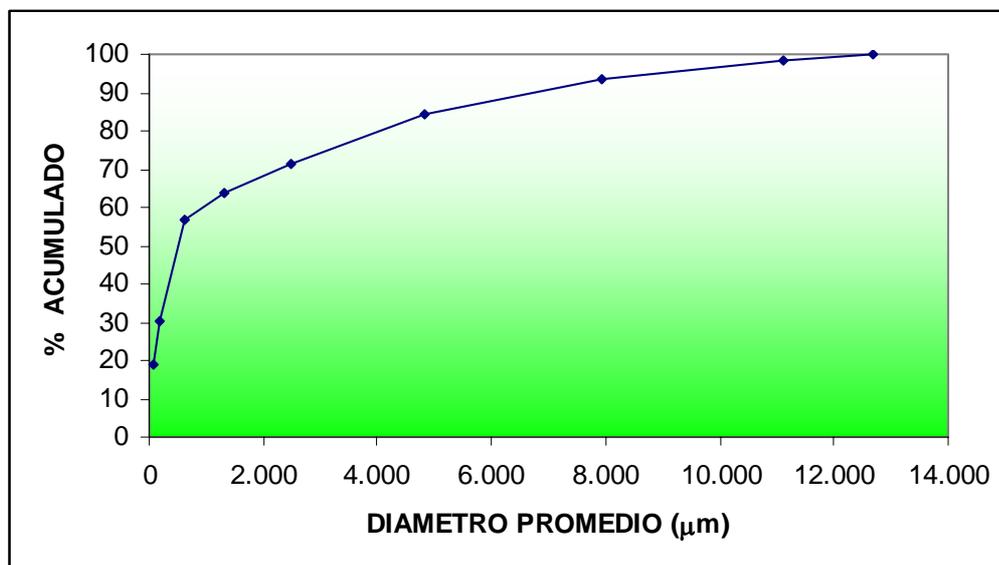
La densidad a granel, porosidad, densidad aparente, y los diámetros promedio de partículas (base área y base volumen) se muestran en la tabla 4.2. El valor obtenido para la densidad a granel de la mezcla de sólidos fue de 1966,9 kg/m³, el cual representa casi el doble de la densidad del agua, e incluye el volumen ocupado por los espacios vacíos.

En cuanto a la porosidad de la muestra granular original, el resultado indica que el 42,66% del volumen total de los sólidos particulados son espacios vacíos, y el resto (57,34%) es ocupado por los sólidos compactos. La porosidad de los sólidos granulares es un parámetro importante para el flujo de gas secante que debe pasar a través del lecho empacado, antes de alcanzar la velocidad mínima de fluidización. Porque en efecto, el valor de esta velocidad mínima depende a su vez del valor de la porosidad del lecho de sólidos en la base del secador, justo antes de iniciarse la fluidización de los sólidos a secar. Por su parte la densidad aparente del mineral de alimentación resultó ser 3375 kg/m³, la cual es muy importante para los cálculos de fluidización.

En cuanto al diámetro promedio (base área) de la mezcla de sólidos particulados, se obtuvo como resultado 269,1µm. Este parámetro es muy útil al momento de hacer los cálculos de fluidización, porque se relaciona con el área superficial específica de la partícula, donde incide el flujo de gas. Cuando la mezcla de partículas es homogénea, los diámetros promedios (base área y base volumen) son iguales. Por otra parte, el mineral de hierro analizado arrojó un diámetro base volumen de 2588,18µm. En consecuencia, la mezcla de partículas sólidas de mineral de hierro estudiado en este trabajo contiene una amplia variabilidad granulométrica (heterogénea).



(a)



(b)

Figura 4.1: Distribución de tamaño de partículas. (a) análisis diferencial;
(b) análisis acumulativo.

Tabla 4.2: Resultados de densidad a granel y aparente, porosidad, diámetro promedio base área y base volumen, de los sólidos alimentados al secador.

PARAMETROS		VALOR NUMERICO
DENSIDAD A GRANEL	ρ_G (kg/m ³)	1966,9
POROSIDAD	ϵ	0,4266
DENSIDAD APARENTE	ρ_{ap} (kg/m ³)	3375
DIAM. PROM. (base área)	$dp_{b.a}$ (μ m)	269,1
DIAM. PROM. (base volumen)	$dp_{b.v}$ (μ m)	2588,18

La composición química de la muestra de mineral granular fue suministrada por el Laboratorio de Química de Orinoco Iron (tabla 4.3). La composición química del mineral de hierro es muy importante, para determinar si los sólidos cumplen con las especificaciones mínimas requeridas por la empresa.

Tabla 4.3: Composición química del mineral de hierro (base seca).

COMPUESTO	%
Fe ₂ O ₃	94,0500
Fe ₃ O ₄	0,0000
FeO	0,0000
CaO	0,0500
MgO	0,0100
Al ₂ O ₃	0,7900
SiO ₂	1,0400
MnO	0,0000
P	0,0650
S	0,0240
H ₂ O LIGADA	3,8300

Los resultados revelaron que el compuesto predominante en el mineral de hierro es la hematita (Fe₂O₃), con un contenido de 94,05%, seguido de agua ligada (3,83%), óxido de silicio (SiO₂) con 1,04%, alúmina (Al₂O₃) 0,79%; y otros compuestos minoritarios (CaO, MgO, P y S) que totalizan 0,149%.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL GAS DE FLUIDIZACIÓN: DENSIDAD Y VISCOSIDAD A LA TEMPERATURA Y PRESIÓN DEL LECHO, VELOCIDAD SUPERFICIAL DE FLUIDIZACIÓN EN EL SECADOR DE MINERAL.

Según datos suministrados por el sistema IBH de Orinoco Iron, la temperatura promedio mensual en el lecho fluidizado es 116°C, a 0,98atm de presión (tabla B.2) y es superior a la temperatura de vaporización del agua para garantizar la operación de secado, cuidando que no sea muy elevada para evitar la fragmentación térmica de las partículas del lecho. La presión significa la presencia de un tiro negativo leve, para ayudar al gas de fluidización a ascender.

Por su parte, los resultados de las propiedades físicas del gas de fluidización revelaron una densidad 1,6654 de kg/m³ y viscosidad 2,07.10⁻⁵ kg/m.s (tabla 4.4) a 116°C y 0,98 atm. Dichos parámetros dependen de las condiciones de temperatura y presión en que se encuentra el sistema, además de la composición del gas que se utiliza para fluidizar.

Tabla 4.4: Densidad y viscosidad del gas de fluidización, a la temperatura de 116°C

PARAMETROS	VALOR NUMERICO
DENSIDAD ρ_g (kg/m ³)	1,6654
VISCOSIDAD μ (kg/m.s)	2,07.10 ⁻⁵

Por otro lado, la composición del gas de fluidización se presenta en la tabla B.3 La velocidad superficial del gas de fluidización en el secador no varía; es constante para el valor de 5,7467 m/s (figura 4.2 y 4.3).

4.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS (VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN Y VELOCIDAD TERMINAL DE LAS PARTÍCULAS), Y CARACTERÍSTICAS DEL LECHO FLUIDIZADO (CLASIFICACIÓN DE PARTÍCULAS SEGÚN GELDART Y RÉGIMEN DE FLUIDIZACIÓN) EN EL SECADOR.

4.3.1 Velocidad mínima de fluidización

En la tabla B.4 se presentan los resultados de la velocidad mínima de fluidización en función del diámetro de las partículas sólidas. Los valores numéricos contenidos en dicha tabla se muestran gráficamente en la figura 4.2. En ella se aprecia que cuanto mayor es el diámetro promedio de partículas, más alta es la velocidad mínima necesaria para levantar a un lecho de partículas de un determinado diámetro promedio.

Como se confirmó anteriormente, en el caso de Orinoco Iron el sistema de secado es alimentado por una mezcla de mineral de hierro de variabilidad granulométrica. Por lo tanto, es fácil predecir que mientras algunas partículas fluidizan rápidamente, a otras les cuesta más levantarse y formar parte del lecho fluidizado; y consecuentemente, por su corto tiempo de residencia estas partículas no logran secarse completamente.

En las gráficas de la velocidad mínima de fluidización y de la velocidad superficial del gas de fluidización, en función del diámetro promedio de partículas (figura 4.2), se aprecia que la fluidización comienza para las partículas más pequeñas (con diámetro promedio de $73,5 \mu\text{m}$) a la velocidad mínima más baja ($0,0053 \text{ m/s}$); y para las más grandes ($12700 \mu\text{m}$) a la velocidad mínima más alta ($3,2189 \text{ m/s}$). La velocidad del gas de fluidización fue constante ($5,7467 \text{ m/s}$) y superior a las velocidades mínimas del material particulado; lo que significa que todas las partículas en el secador fluidizan por efecto de la rapidez del flujo del gas de fluidización.

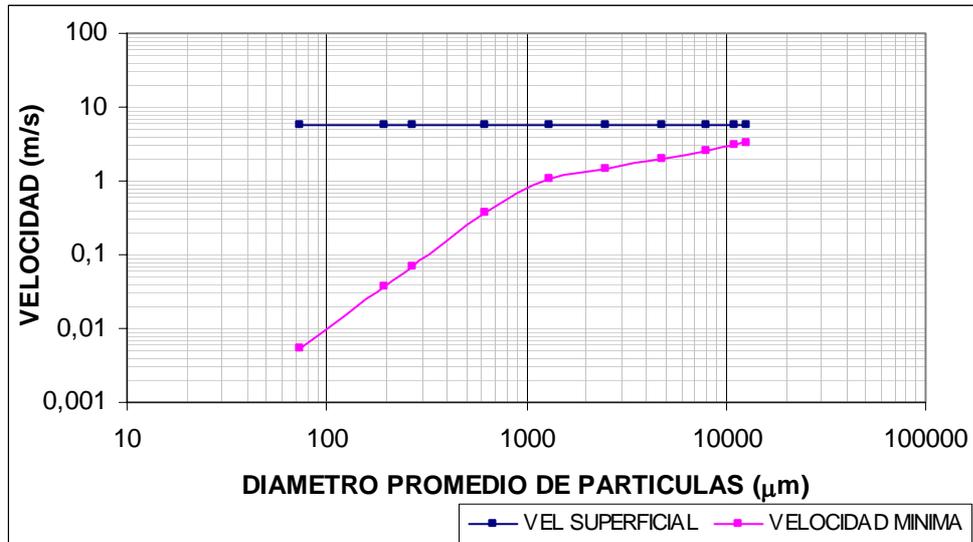


Figura 4.2: Representación gráfica de la velocidad mínima de fluidización y de la velocidad superficial del gas, para diferentes diámetros promedios de partículas.

Por otra parte, en la figura 4.2 también se observa que para las partículas con diámetro promedio de $1000\mu\text{m}$, ocurre una disminución del valor de la pendiente de la velocidad mínima. Esto se atribuye a que en este punto de inflexión, las partículas son lo suficientemente grandes y pesadas para que las fuerzas inerciales que impulsan el movimiento ascensional de ellas, comiencen a ser afectadas por las fuerzas gravitacionales. Por el contrario, para las partículas de diámetros promedios inferiores a $1000\mu\text{m}$ y por ende más ligeras, las fuerzas gravitacionales influyen más débilmente sobre las fuerzas inerciales de impulso ascendente. En conclusión, a las condiciones operacionales del secador industrial, las partículas con diámetros promedios mayores que $1000\mu\text{m}$ ofrecen mayor resistencia a ser fluidizadas que las partículas de menores tamaños.

4.3.2 Velocidad terminal de las partículas

La velocidad terminal indica qué partículas son arrastradas fuera del secador. En la tabla B.5 se muestra la velocidad terminal de las partículas, para diferentes diámetros promedios de éstas.

En la figura 4.3 se representa gráficamente las velocidades terminales de las partículas y la superficial del gas en el lecho, en función del diámetro promedio. Resulta evidente que la velocidad superficial intercepta a la velocidad terminal en el rango de diámetros promedios de partículas entre 618,5 y 1321 μm , para el diámetro de partícula de 940 μm , aproximadamente. En la parte de la gráfica donde la velocidad terminal resulta menor que la rapidez superficial, las partículas son arrastradas fuera del secador; mientras que por el contrario, en la sección de la gráfica en donde la velocidad terminal es mayor a la superficial, las partículas sólidas son devueltas al lecho. Cuando existe mucho arrastre, las partículas chocan entre ellas y pierden *momentum* (cantidad de movimiento) y energía cinética, y son devueltas parcialmente, perdiendo altura en el lecho.

Es decir, las partículas cuyos diámetros están comprendidos entre 73,5 y 940 μm son arrastradas por el gas de fluidización; y aquellas otras de tamaños superiores a 940 μm se mantienen fluidizadas en el lecho.

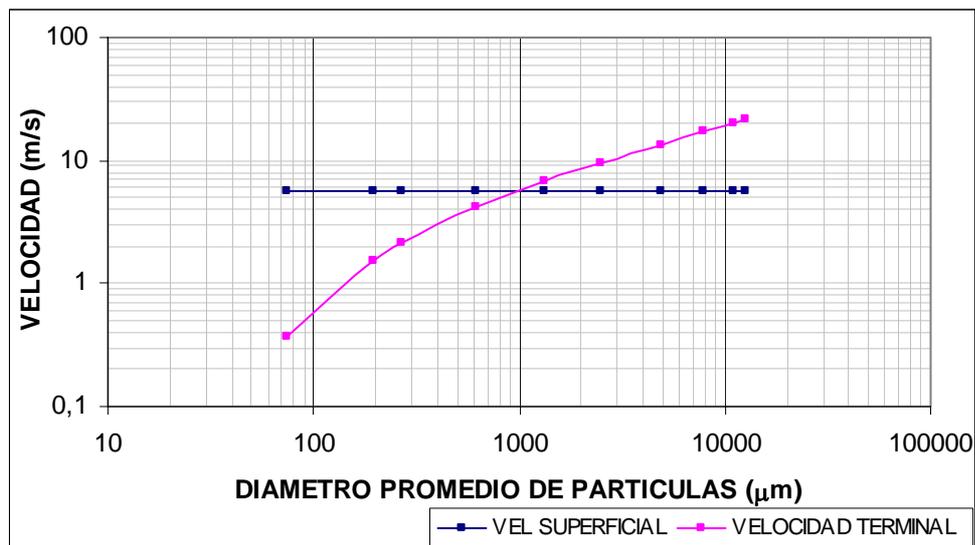


Figura 4.3: Representación gráfica de la velocidad terminal de las partículas y de la velocidad superficial del gas de fluidización, para distintos diámetros promedios de partículas.

4.3.3 Clasificación según Geldart

La clasificación Geldart [6] permite determinar cómo fluidizan las partículas. El diámetro promedio base área (269,1 μm), y la diferencia entre la densidad aparente de la partícula y la densidad del fluido ($\rho^* = 3373,33 \text{ kg/m}^3$) mostradas en la tabla 4.1, usualmente son graficados (figura 4.4) según Geldart, como se muestra a continuación:

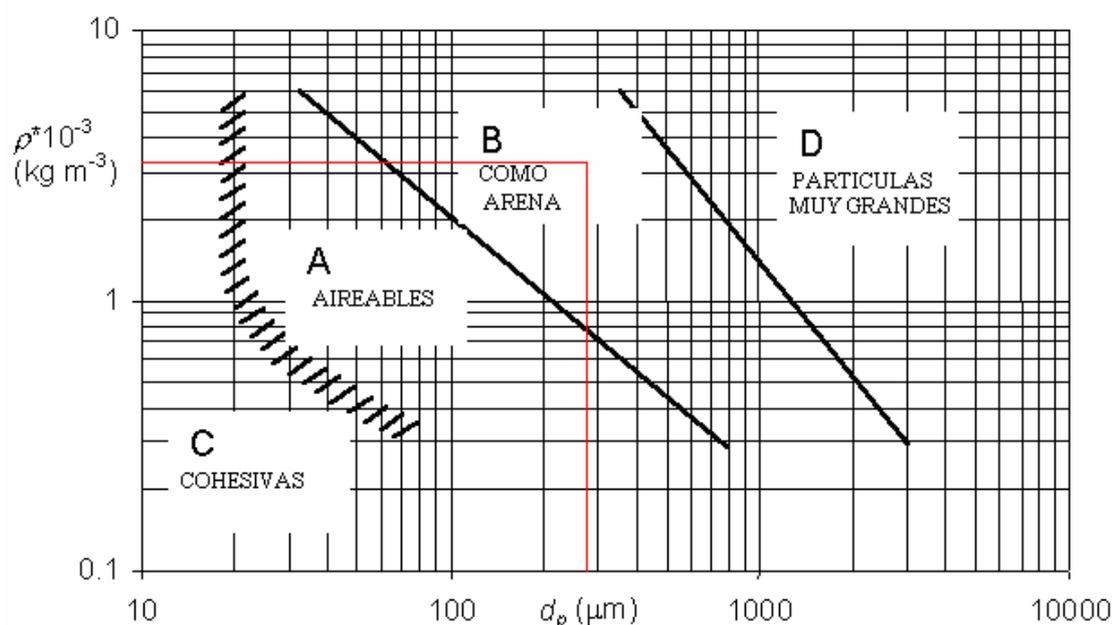


Figura 4.4: Representación gráfica, según Geldart, de como fluidizan las partículas [6].

De acuerdo a los resultados obtenidos de diámetro promedio de partículas base área (269,1 μm) y de la diferencia entre las densidades aparente y la del fluido 3375 y 1,6654 kg/m^3 respectivamente, las partículas fluidizan según las características del grupo B (como arena), ubicado entre los grupos A (aireables) y D (partículas muy grandes), como se muestra en la gráfica de la figura 4.4, con formación de burbujas de gran tamaño. La desventaja más importante en este tipo de régimen es la deficiencia en el contacto gas-sólido debido a la formación de burbujas.

4.3.4 Régimen de fluidización

La aplicación de la metodología de Grace [7] en base a los mapas de regímenes de fluidización representados en la gráfica de u^* vs. d_p^* (figura 4.5), permitió determinar que para el secador industrial de Orinoco Iron C.A., sus condiciones operacionales correspondieron a partículas con valores (d_p^*) y velocidad adimensional (u^*) de 13,57 y 3,38 respectivamente. Los valores de estos parámetros ubican al régimen de fluidización de dicho secador en un estado de *transición a lecho turbulento*, justo por encima de la velocidad terminal u_t .

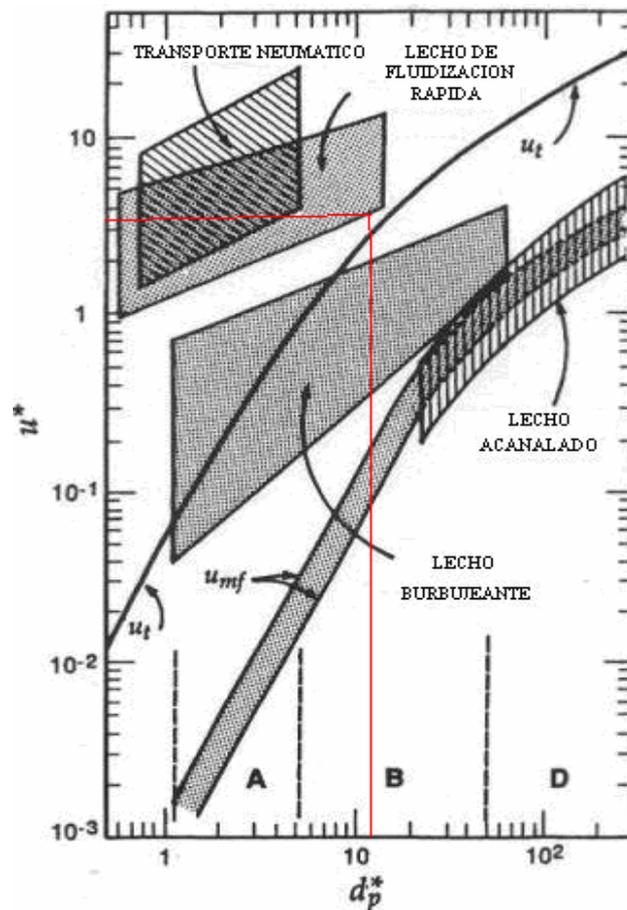


Figura 4.5: Mapa de regímenes de fluidización según Grace [7].

4.4 EFECTO DE LA GRANULOMETRÍA DE LOS SÓLIDOS DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR DE MINERAL SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS CINÉTICAS DE SECADO Y LAS CURVAS DE VELOCIDAD DE DESHIDRATACIÓN, EN FUNCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE HUMEDAD LIBRE EN LOS SÓLIDOS.

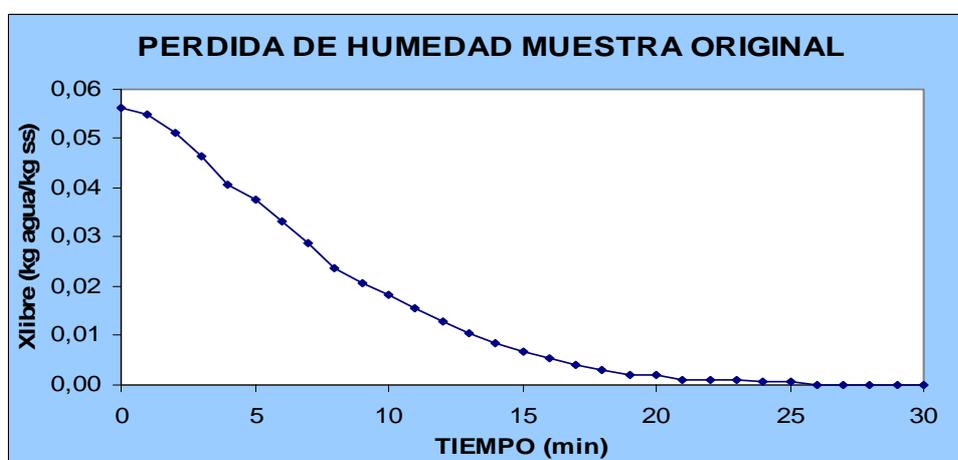
Para las muestras de mineral alimentado al secador de lecho fluidizado (M0), como también aquellas obtenidas después de tamizar (6, 10, 16, -16 *mesh*), y cuyos cambios de humedad vs. tiempo y los de velocidades de secado vs. humedad libre, a partir de las cuales fueron elaboradas las gráficas de deshidratación correspondientes (figuras 4.5 a 4.10).

Las curvas de secado para la muestra original (M0) se presentan en las figuras 4.6.a y b. En cuanto a la pérdida de humedad en función del tiempo (figura 4.6.a), la mayor humedad libre inicial registrada para esta muestra fue de 0,0564 kg agua/kg ss; y al final una humedad de equilibrio (X^*) de 0,002001 kg agua/kg ss, aproximadamente a los 25 minutos de haber iniciado el proceso de secado. La mayor velocidad de pérdida de humedad ocurrió durante los primeros 8 minutos, siguiendo un comportamiento lineal (figura C.1) según el modelo de regresión obtenido, y con una dispersión mínima de los datos experimentales ($R^2 = 0,9975$). El secado prosiguió hasta los 25 minutos siguiendo un patrón no lineal (figura C.2) con $R^2 = 0,9975$.

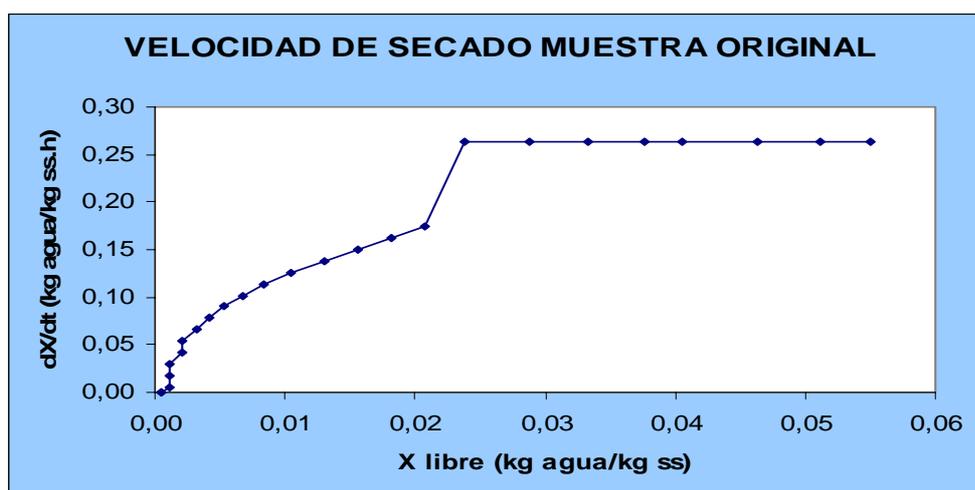
Por otra parte, se evidenciaron dos zonas de secado bien diferenciadas: una de velocidad de secado constante y la otra de velocidad de secado decreciente (figura 4.6.b). En la zona de velocidad constante, la superficie expuesta y saturada de agua era retirada a una velocidad de 0,2640 kg agua/kg ss.h.

Es importante señalar que el primer valor con respecto a la velocidad de secado no se tomaron en cuenta para todas las gráficas por pertenecer a la zona de precalentamiento, es una etapa muy transitoria y se aleja del comportamiento.

Este período de velocidad constante se inició con una humedad libre del sólido de 0,0550 kg agua/kg ss y finalizó en una humedad libre crítica de 0,0238 kg agua/kg ss; registrándose una pérdida de humedad equivalente al 56,80 % (figura 4.6.b). La zona de secado decreciente mostró dos tramos característicos: uno que se inició a la velocidad crítica de 0,2640 kg agua/kg ss.h (*primer período postcrítico*), hasta llegar a 0,0207 kg agua/kg ss.h y una humedad libre correspondiente a 0,0238 kg agua/kg ss; y otro desde este valor de humedad hasta secado total del agua no ligada (*segundo período postcrítico*).



(a)



(b)

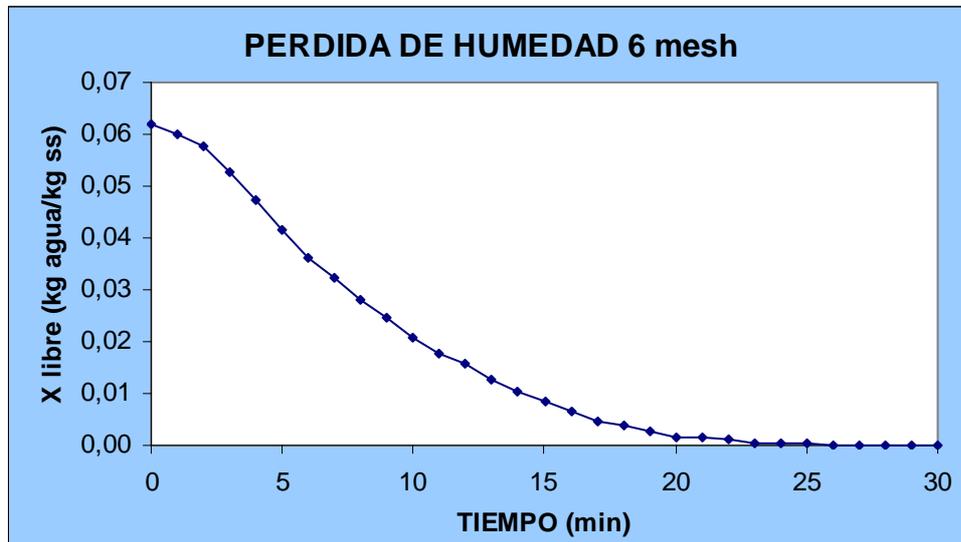
Figura 4.6: Curvas de secado para la muestra original alimentada (a) pérdida de humedad vs. tiempo. (b) velocidad de secado vs. humedad libre.

En el primer tramo postcrítico se logró disminuir la humedad en un 12,77%, a una rápida disminución de la velocidad de secado, aparentemente lineal respecto a la humedad libre del sólido. Durante este primer período en la zona decreciente, la velocidad de secado evidencia evaporación del agua mediante difusión del líquido hacia la superficie. Y el segundo período postcrítico pareció corresponder a la presencia de una superficie que no mantuvo una película de agua constante. Por su forma en la gráfica, se puede inferir que el sólido está formado por un núcleo más compacto que retiene el agua con más fuerza; y por ende, siguiendo un patrón no lineal. La pérdida de humedad registrada para este segundo período postcrítico fue de 30,43%.

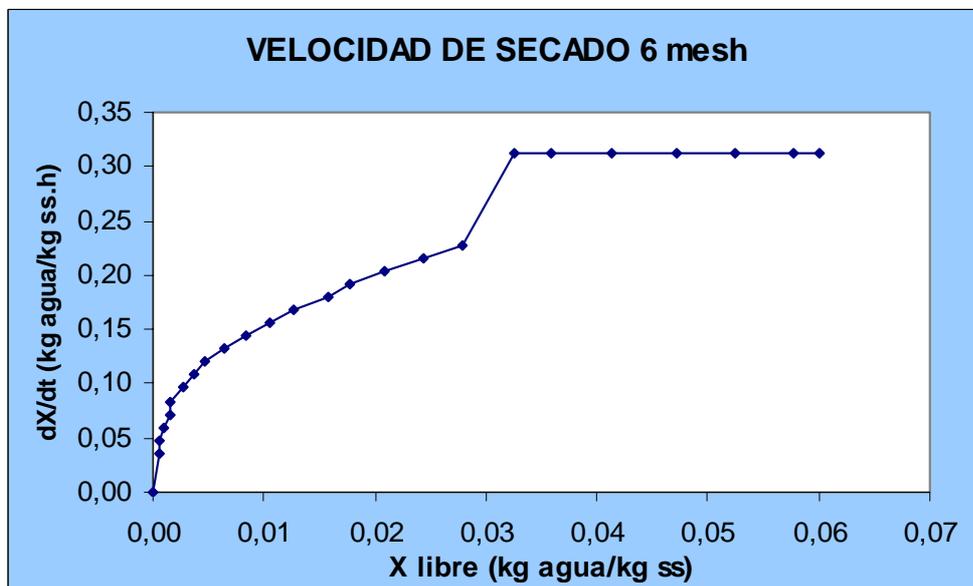
Por otra parte, las curvas de secado para la muestra de mineral correspondiente al tamiz de abertura 6 *mesh* se presentan en las figuras 4.7.a y b. Desde una humedad libre inicial de 0,0620 kg agua/kg ss, la pérdida más significativa y rápida de humedad se registró durante los primeros 7 minutos del proceso de secado, siguiendo un comportamiento lineal (figura C.3), con una dispersión mínima de los datos experimentales ($R^2 = 0,9960$); y luego se hizo más lenta hasta alcanzar finalmente una X^* de 0,0001 kg agua/kg ss, a los 26 minutos (figura 4.7.a); exhibiendo una tendencia no lineal, con un coeficiente de regresión polinomial R^2 de 0,9982 (figura C.4).

Para esta misma muestra de 6 *mesh* la variación de la velocidad de secado en función de la humedad libre del sólido, también reveló la presencia de las mismas dos zonas (constante y decreciente) de secado (figura 4.7.b). Durante la pérdida de humedad a velocidad constante de 0,3120 kg agua/kg ss.h, el agua no ligada disminuyó en 45,96% respecto al inicio hasta 0,0325 kg agua/kg ss de humedad libre crítica; es decir, un valor porcentualmente mucho más bajo que el experimentado por la muestra de alimentación al secador, como era de esperarse, debido a que el área interfacial de este tipo de partículas es menor que el de la muestra original. En esta etapa, la velocidad de evaporación del agua desde la

superficie del sólido se iguala a la rapidez con la cual la misma es evaporada desde éste; por lo tanto, el cambio neto es cero.



(a)



(b)

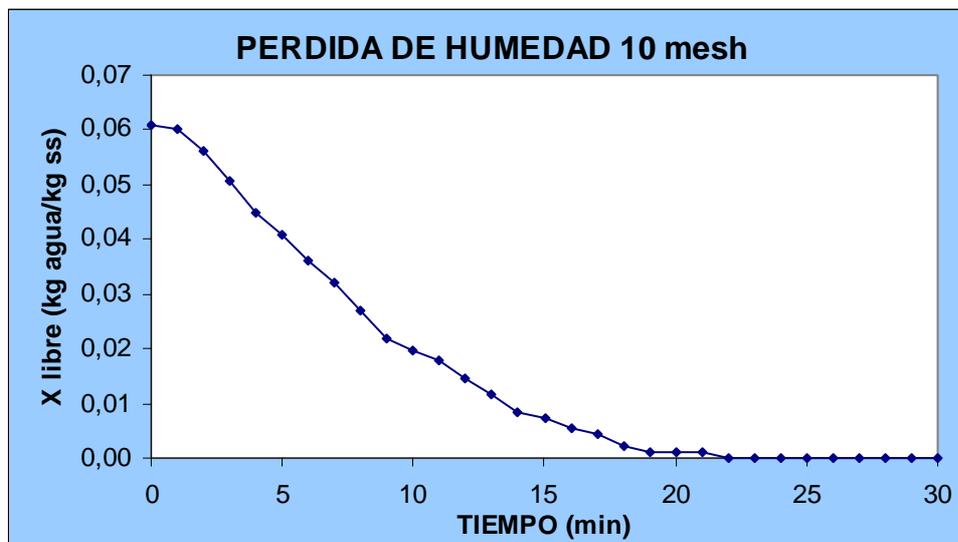
Figura 4.7: Curvas de secado para la muestra del tamiz 6 *mesh*. (a) pérdida de humedad vs. tiempo. (b) velocidad de secado vs. humedad libre.

Para la etapa de velocidad descendente, el perfil de disminución de humedad exhibió nuevamente dos tramos postcríticos característicos: el primero iniciado a los valores críticos de velocidad de secado y humedad libre de 0,3120 kg agua/kg ss.h y 0,0325 kg agua/kg ss, respectivamente, y que culminó a una velocidad de 0,2280 kg agua/kg ss.h y humedad libre de 0,0280 kg agua/kg ss. En este primer período postcrítico, la variación de la velocidad decreciente también exhibió una línea recta (dependencia proporcional) respecto a la humedad del sólido, esencialmente por la velocidad del movimiento del agua no ligada dentro de éste, con una pérdida de humedad de 13,89 %.

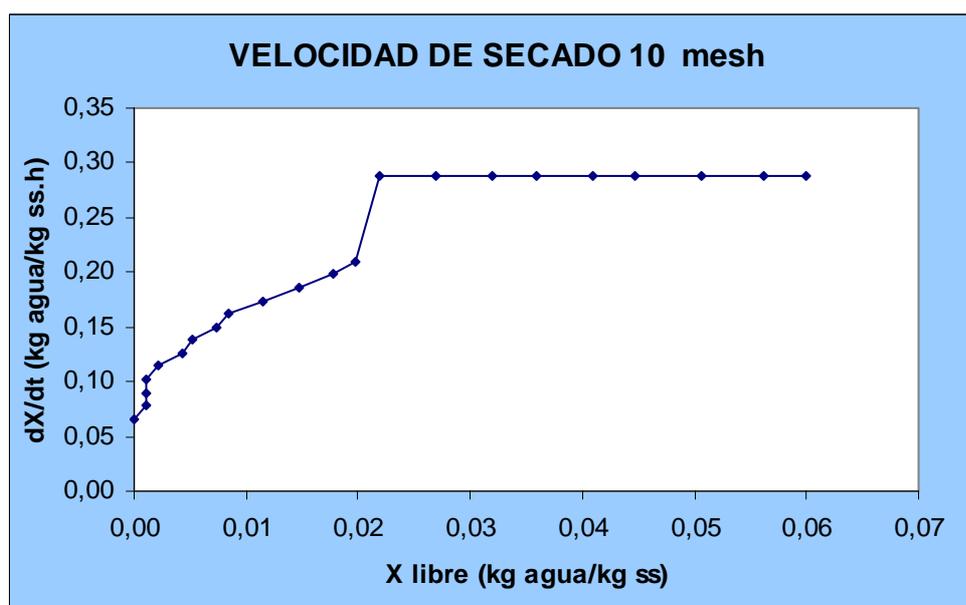
En el segundo tramo postcrítico de la zona decreciente, análogamente a lo ocurrido para la muestra original de sólidos alimentados al secador, las partículas se comportaron como un núcleo compacto rodeado de una cubierta más porosa, donde la pérdida de humedad registrada para este tramo fue de 40,15 %.

Por otra parte, para la muestra del tamiz 10 *mesh* las curvas de secado correspondientes se presentan en la figura 4.8. Transcurridos los primeros 9 minutos se había producido la mayor pérdida de agua, mediante un comportamiento lineal con un coeficiente de regresión (R^2) de 0,9983 (figura C.5). Luego la operación de secado continuó más lentamente hasta finalizar a los 22 minutos (figura 4.8.a). Desde los 9 hasta 22 minutos siguió un comportamiento no lineal ($R^2 = 0,9936$) según la figura C.6.

El mayor contenido de humedad libre inicial en estas partículas fue de 0,0610 kg agua/kg ss; es decir, levemente más bajo que el de las partículas de 6 *mesh* (0,0620 kg agua/kg ss). Esto se explica porque la muestra de partículas de menor diámetro (10 *mesh*) posee mayor área superficial total que la muestra de partículas más grandes (6 *mesh*).



(a)



(b)

Figura 4.8: Curvas de secado para la muestra del tamiz 10 *mesh*. (a) pérdida de humedad vs. tiempo. (b) velocidad de secado vs. humedad libre.

En consecuencia, la velocidad de transferencia de masa responsable de la pérdida de humedad durante la preparación inicial (homogenización, tamizado, traslado y pesado) de la muestra de 10 *mesh*, fue mayor que la que ocurrió mientras se preparaba la muestra de 6 *mesh*; pues a menores diámetros de

partículas, mayor es el área superficial total de transferencia de calor y masa, y por ende, más rápida es la pérdida de humedad hacia el aire del laboratorio. Por su parte, la figura 4.8.b revela la variación de la velocidad de secado en función de la humedad libre cedida por los sólidos retenidos en el tamiz de malla 10. Análogamente al secado de las muestras anteriores, aquí también se evidenciaron las dos etapas ya mencionadas (velocidades constante y decreciente). La zona de velocidad constante exhibe un período más prolongado (9 minutos), en comparación con el de las partículas de mayor tamaño (6 *mesh*), registrando una velocidad de 0,2880 kg agua/kg ss.h, con pérdida de humedad de 63,58% respecto al contenido de humedad inicial.

Nuevamente, la zona de velocidad de secado decreciente se presentó en dos tramos similares a los casos anteriores. El primero de ellos confirmó también una proporcionalidad lineal entre la velocidad de secado y la humedad del sólido, iniciando con la velocidad crítica con un valor de 0,2880 kg agua/kg ss.h, correspondiente a una humedad crítica de 0,0219 kg agua/kg ss, la cual resultó menor que la registrada para las partículas pertenecientes al tamiz 6 *mesh*. Este tramo culminó a la humedad libre de 0,0198 kg agua/kg ss, y provocó una reducción del 9,33% del contenido de agua en el sólido, respecto a la muestra inicial.

Por otra parte, también se constató la presencia de un segundo tramo o período postcrítico perteneciente a la zona de velocidad de secado decreciente, en el cual el sólido pareció tener mayor dificultad para ceder la humedad no ligada, con escasa reposición de agua desde el interior del sólido. La humedad perdida para este tramo fue de 27,09 % en relación al inicio del secado.

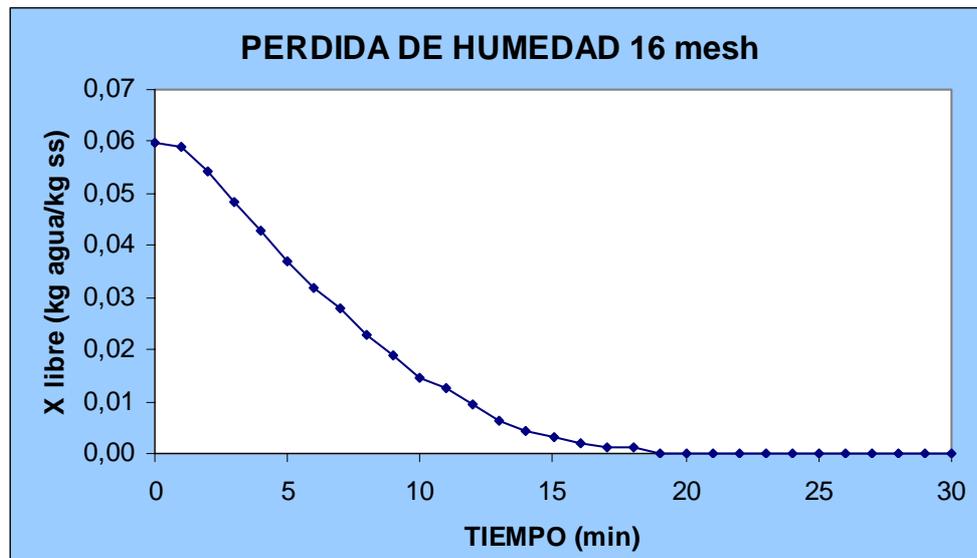
Las curvas de deshidratación para las partículas de 16 *mesh* se presentan en las figuras 4.9.a y b. El secado de este tipo de sólidos se inició a la humedad no ligada de 0,0599 kg agua/kg ss, y finalizó a una humedad de equilibrio (X^*) de 0,001449 kg agua/kg ss, a los 20 minutos, aproximadamente (figura 4.9.a). La

pérdida más importante de humedad ocurrió durante los primeros 10 minutos, describiendo un comportamiento lineal (figura C.7) según la regresión mostrada, y con una dispersión mínima de los datos experimentales ($R^2 = 0,9960$). El secado continuó hasta los 20 minutos siguiendo un patrón no lineal (figura C.8) con $R^2 = 0,9929$.

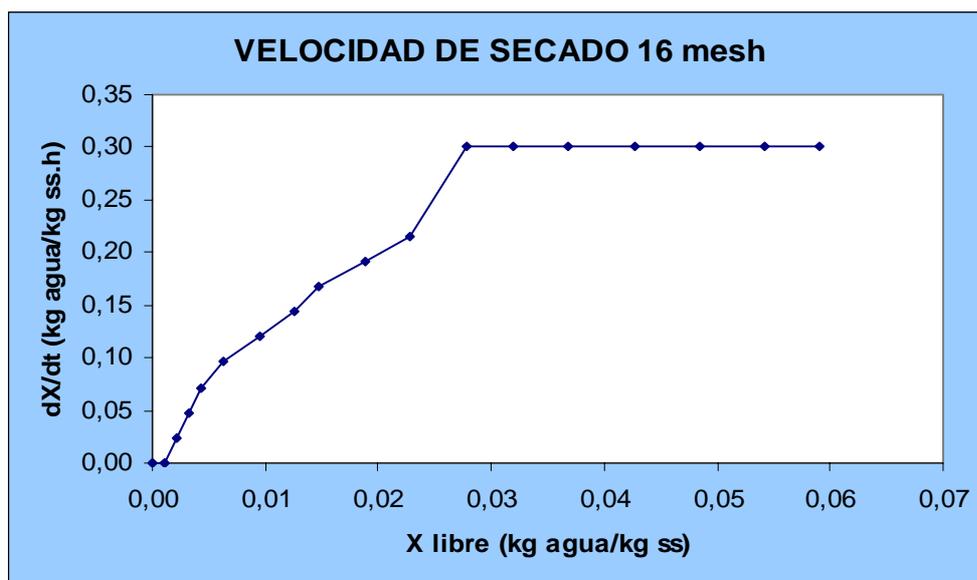
En la figura correspondiente a velocidad de secado vs. humedad libre (figura 4.9.b), también se constató la presencia de las dos zonas de secado bien diferenciadas: una de secado constante y la otra decreciente. En la zona de velocidad de secado constante, la superficie expuesta y saturada de agua fue retirada a una velocidad de 0,3000 kg agua/kg ss.h, hasta perder 75,15 % del contenido de humedad inicial; la más elevada deshidratación porcentual en este período entre todas las muestras de sólidos ensayadas en el presente trabajo.

Para el tramo a velocidad decreciente también resaltan dos secciones: la primera donde ocurre un comportamiento lineal que se inició en el punto crítico (humedad libre de 0,0147 kg agua/kg ss y velocidad de secado a 0,3000 kg agua/kg ss.h), hasta finalizar en el punto correspondiente a humedad libre de 0,0126 kg agua/kg ss y velocidad de secado de 0,1440 kg agua/kg ss.h; durante lo cual se registró 14,11 % de pérdida de humedad respecto al instante inicial del secado.

La segunda sección de la gráfica (figura 4.9.b) presentó una concavidad hacia abajo, como en los casos anteriores; por lo que se puede inferir que este tipo de partículas opone resistencia al secado. Al comparar con las gráficas anteriores de velocidades de secado esta resistencia parece disminuir, ya que la concavidad se hace menos acentuada para este tipo de partículas específicamente. La pérdida de humedad aportada por esta sección fue de 10,74 % en base a la humedad inicial.



(a)



(b)

Figura 4.9: Curvas de secado para la muestra del tamiz 16 *mesh*. (a) pérdida de humedad vs. tiempo. (b) velocidad de secado vs. humedad libre.

Ahora bien, las curvas de secado para todas las partículas restantes correspondientes a tamaños por debajo de 16 *mesh* (-16 *mesh*) se presentan en las figuras 4.10.a y b.

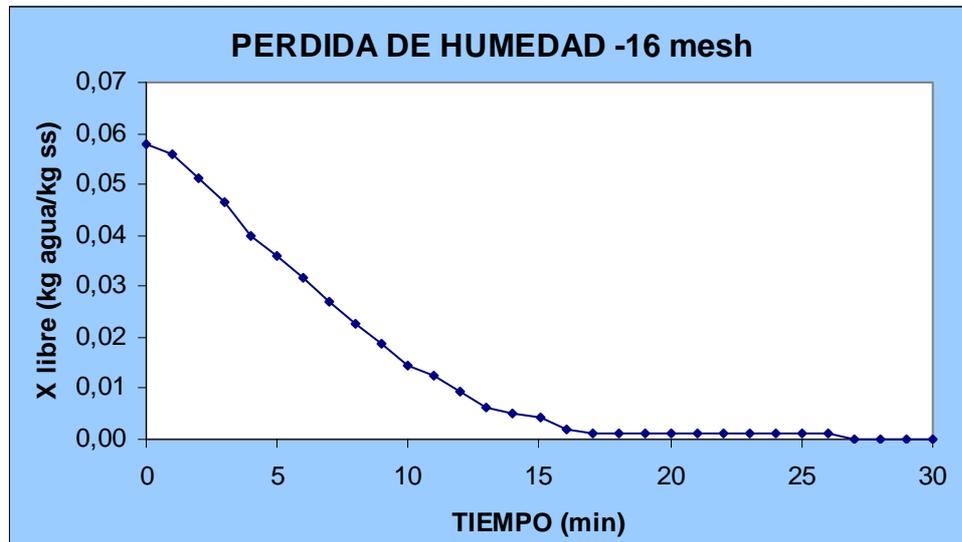
Para esta muestra de sólidos mucho más finos, el secado se inició a la humedad libre de 0,0580 kg agua/kg ss y cesó a los 17 minutos, hasta alcanzar una humedad de equilibrio de 0,001472 kg agua/kg ss. Durante los primeros 10 minutos el contenido de humedad disminuyó linealmente, siguiendo un modelo de regresión ($R^2 = 0,9961$), según la figura C.9. Entre los 10 y 17 minutos el secado de los sólidos finos cambió a una tendencia no lineal, que se ajustó mediante un modelo de regresión polinomial ($R^2 = 0,9906$) mostrado en la figura C.10.

Por su parte, el período de velocidad constante de secado (0,2760 kg agua/kg ss.h) en esta muestra de sólidos más finos, comenzó desde un contenido de humedad libre de 0,0561 kg agua/kg ss hasta 0,0146 kg agua/kg ss; lo cual produjo una gran pérdida de la humedad inicial (73,90%) durante este período. En cuanto al período de velocidad de secado descendente, se confirmó la existencia de los dos tramos bien diferenciados: el primer período postcrítico representado por un decrecimiento lineal desde la humedad crítica (0,0146 kg agua/kg ss) hasta la humedad libre de 0,0126 kg agua/kg ss; con pérdida de humedad (14,11%) controlada por la difusión; y el segundo período postcrítico decreciente desde este punto hasta arribar al equilibrio (velocidad de secado nula), a humedad libre de 0,0011 kg agua/kg ss. En esta segunda etapa postcrítica el agua retirada alcanzó el 8,43% de la humedad inicialmente presente en los sólidos.

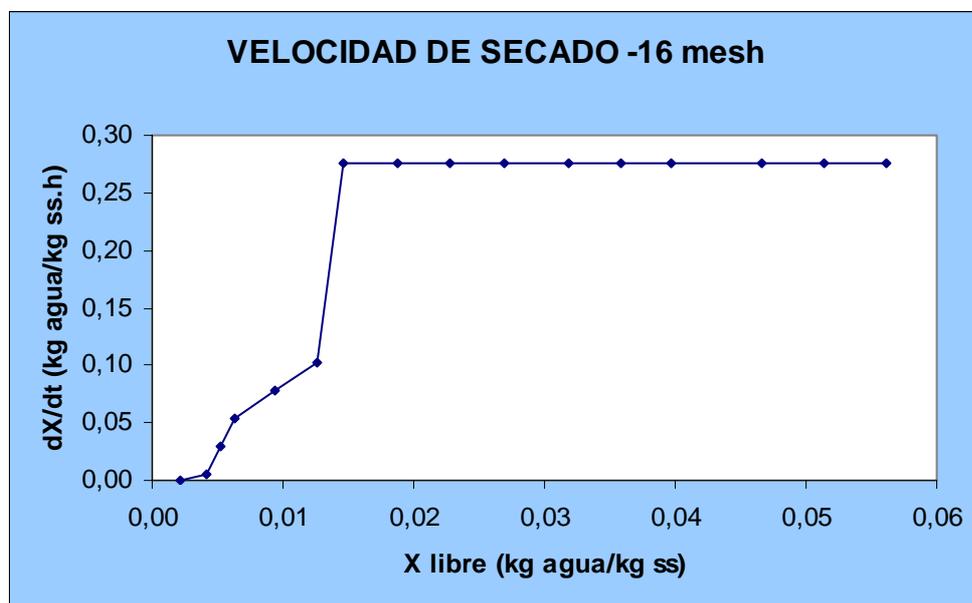
Además, es importante destacar que durante el primer período postcrítico, fue esta muestra con las partículas más finas, la que tuvo el más pronunciado descenso de la velocidad de secado, entre todos los comportamientos exhibidos por la totalidad de las muestras de sólidos estudiadas en este trabajo.

En esta muestra de sólidos más finos, el período de secado a velocidad constante fue uno de los más prolongados, por el efecto favorable de la mayor área superficial total de los sólidos finos sobre la evaporación de la humedad no ligada. Sin embargo, en el segundo período postcrítico, la predominancia de

partículas mucho más finas ($<1000\mu\text{m}$) y de menor porosidad entre ellas, fue desfavorable para la pérdida de humedad.



(a)



(b)

Figura 4.10: Curvas de secado para la muestra del tamiz -16 *mesh*. (a) pérdida de humedad vs. tiempo. (b) velocidad de secado vs. humedad libre.

Según el perfil de *humedad libre* en función del *tiempo* de secado de los sólidos granulares más finos ($d_p < 1000\mu\text{m}$), se observó que al aproximarse a la culminación del secado, hubo una retención inusual de la humedad libre remanente (0,001060 kg agua/kg ss) durante 9 minutos, entre los minutos 17 y 26 (figura 4.10.a). Un minuto después de este lapso, los sólidos finalmente lograron alcanzar el equilibrio (humedad libre nula).

Esta retención pudo haber sido provocada por la formación de aglomerados de las partículas más finas o polvos del mineral, muy compactos y de escasa porosidad externa e interna, que impedían transitoriamente la liberación del agua no ligada que aún permanecía atrapada en los espacios interparticulares dentro de las compactas capas de finos y polvos de esta muestra. Dicho fenómeno de retención final de humedad se reflejó también en la gráfica *velocidad de secado* versus *humedad libre* (figura 4.10.b), el cual se apareció, aunque muy limitadamente, en el secado de los sólidos de la muestra original (figuras 4.6.a y b) con 30,13% de su masa constituida por partículas finas de diámetros promedios entre 76,5 y 193,5 μm (figuras 4.1.a y b.); como también en el secado de la muestra de 16 *mesh*, correspondiente a abertura de malla 1000 μm (figuras 4.9.a y b).

Las formas de las curvas de velocidad de secado con respecto a la humedad de los sólidos presentadas en este trabajo, particularmente en cuanto a los dos períodos postcríticos, tienen similitud con las exhibidas por Maldonado y Pacheco-Delahaye [16] durante la deshidratación de brócoli (*Brassica oleraceae L var. Italica Plenck*) a temperaturas variables de 60, 70 y 80 °C. Estos investigadores obtuvieron formas curvas en las velocidades de secado vs. humedad en este alimento vegetal, que fueron modificándose con el incremento de la temperatura. Los poros del tejido vegetal permanecían muy cerrados durante el secado a 60 °C; e iban abriéndose parcialmente al ser deshidratado a la temperatura intermedia de 70 °C, y quedaron mucho más abiertos a la temperatura más alta (80 °C), facilitando la difusión de la humedad a esta temperatura más alta. Dichos incrementos de temperatura provocaron, en consecuencia, una

evolución de las formas de dichas curvas, desde un período postcrítico lineal difusivo corto, y otro curvo y extenso a 70 °C, similar a las curvas exhibidas con el mineral de hierro granular en el presente trabajo, hasta otra forma en la cual el período difusivo lineal incrementó su predominancia a 80° C. En el caso del secado del mineral de hierro, prevaleció en las partículas el comportamiento no lineal típico de la limitada migración de humedad interna al exterior.

A continuación se presentan resultados consolidados sobre los efectos de la granulometría de los sólidos sobre variables características del proceso de secado: duración de los períodos de deshidratación (tabla 4.5); velocidades de secado constante y en el punto de inflexión o cambio del mecanismo de deshidratación a velocidad decreciente (tabla 4.6); humedades libres críticas en los períodos de secado (tabla 4.7); y pérdidas porcentuales de humedad respecto a los contenidos iniciales de agua en los sólidos (tabla 4.8).

Es importante destacar que la duración de cada período de secado fue estimada con apreciación de una hora (1 h), dadas las características particulares de los procesos de secado realizados en el laboratorio, los cuales fueron llevados a cabo en una pequeña balanza automática de secado relativamente rápido.

Duración de los períodos de secado

El período de secado a velocidad constante para las muestras de sólidos tamizados, aumentó con la disminución del tamaño de las aberturas de malla que retuvieron a las partículas (tabla 4.5), desde 7 minutos para las de 6 mesh (3360 μm) y 10 minutos para las de 16 mesh (1000 μm). Esto se atribuye al efecto favorable que ejerce el incremento del área superficial de las partículas por unidad volumétrica de sólidos a medida que decrece el tamaño de éstas, sobre la transferencia de calor y masa que ocurre durante el secado.

Tabla 4.5. Duración de los períodos de secado en función de la granulometría

MUESTRA (<i>mesh</i>)	DURACIÓN DE LOS PERÍODOS DE SECADO (min)		
	PERIODO A VELOCIDAD CONSTANTE	PERIODO A VELOCIDAD DECRECIENTE	
		I POSTCRITICO	II POSTCRITICO
Original	8	1	17
6 (3360 μm)	7	1	17
10 (1680 μm)	9	1	12
16 (1000 μm)	10	1	8
-16 (<1000 μm)	10	1	16

Por su parte, para la muestra original este período a velocidad constante de deshidratación duró 8 minutos, ubicándose entre los valores arrojados por los sólidos de 6 y 10 mesh. Y la muestra que contenía todos los sólidos de partículas más finas y de tamaños inferiores a 1000 μm (-16 mesh) perdió agua no ligada en capa uniforme a condiciones de saturación (velocidad constante) durante 10 minutos; la misma duración de los sólidos retenidos con abertura de malla de 1000 μm (16 mesh). Esto significa que los sólidos particulados mucho más finos presentes en la muestra de -16 mesh, no influyeron significativamente en la duración del período de secado a velocidad constante respecto al caso de los sólidos de 16 mesh; por el efecto detrimental sobre la transferencia de masa de las mas finas partículas, con tendencia aglomeración y ausencia de porosidad.

En relación a los períodos de velocidad decreciente para los sólidos de las distintas granulometrías ensayadas, todos ellos arrojaron resultados similares de una hora (1 h) aproximadamente, durante el primer período postcrítico, donde las caídas lineales de las velocidades de secado fueron cortas, y las humedades internas de las partículas eran retiradas mediante el mecanismo de difusión. Este comportamiento es compatible con lo expresado anteriormente, de que en esencia, las partículas presentaban una cubierta porosa a través de la cual difundía la humedad libre interna (tabla 4.5).

Una vez concluido el primer período a velocidad de secado descendente postcrítico y difusivo, en todas las muestras de sólidos granulares se confirmó la presencia de un segundo período postcrítico, donde la rapidez de secado varió no linealmente respecto a la pérdida de humedad libre, en forma de una curva cóncava hacia abajo. En esta etapa, fue evidente que la deshidratación de los sólidos granulares presentó mayores dificultades, con predominancia de un mecanismo capilar para la migración de la humedad al exterior, y/o tortuoso en el interior de las partículas más compactas, o de los aglomerados conformados por las partículas más finas.

Los resultados indican que la duración del segundo período postcrítico (no lineal) de velocidad de secado decreciente, aparentemente exhibió una tendencia opuesta a la presentada por los sólidos respecto a la duración del período a velocidad de secado constante; disminuyendo con el decrecimiento del tamaño de las partículas, desde 17 minutos para las muestras de 6 mesh (3360 μm) y original, hasta 8 minutos para las de 16 mesh (1000 μm). No obstante, la muestra con las partículas más finas de -16 mesh (<1000 μm) arrojó una duración de 16 minutos para este segundo período postcrítico; un resultado anómalo y dudoso respecto a la tendencia antes mencionada, por la retención prolongada de la humedad libre remanente mencionada arriba.

Velocidades de secado constante y en el punto de inflexión a velocidad decreciente

En cuanto al efecto de las diversas granulometrías sobre los valores de las velocidades de secado constante y en el punto de inflexión o de cambio de mecanismo de deshidratación, a velocidad de secado descendente, se puede apreciar lo siguiente (tabla 4.6):

Tabla 4.6. Velocidades de secado constante y en el punto de inflexión a velocidad decreciente a diversas granulometrías

MUESTRA (mesh)	VELOCIDAD DE SECADO (kg agua/kg ss. h)	
	PERIODO A VELOCIDAD CONSTANTE	EN EL PUNTO DE INFLEXION A VELOCIDAD DECRECIENTE
Original	0,2640	0,1860
6 (3360 μm)	0,3120	0,2520
10 (1680 μm)	0,2880	0,1740
16 (1000 μm)	0,3000	0,1440
-16 (<1000 μm)	0,2760	0,1020

La variación de la rapidez de deshidratación del mineral durante el periodo de velocidad de secado constante (con película externa uniforme de agua a saturación), no evidenció una tendencia definida respecto a la disminución del tamaño de las partículas (3360 a 1000 μm), manteniéndose alrededor de 0,300 kg agua/kg ss. h con desviación estándar de 4 %. Durante este mismo período, la muestra original y la de los sólidos más finos (<1000 μm) perdieron humedad a velocidades de 0,264 y 0,276 kg agua/kg ss. h, respectivamente; demostrando que la presencia de partículas más pequeñas (con mayor área superficial total de transferencia de masa), reduce ligeramente las velocidades de deshidratación en este período; lo cual sustenta la idea del efecto desfavorable del comportamiento de los finos a retener humedad remanente en los aglomerados.

Por otra parte, en el punto de de inflexión o de cambio de mecanismo (de convectivo lineal a limitado por capilaridad o tortuosidad no lineal), entre los dos períodos postcríticos a velocidad decreciente, la rapidez de deshidratación desde el interior de las muestras de sólidos decayó desde 0,2520 a 0,1020 kg agua/kg ss. h con la reducción del tamaño de las partículas (de 3360 a 1000 μm). Mientras tanto la muestra original en el punto de inflexión liberó humedad a un valor (0,1860 kg agua/kg ss.h) comprendido entre los correspondientes a las muestras de 6 y 10 mesh.

Humedades libres críticas

A medida que disminuye el tamaño de las partículas (6 a 16 mesh) decrece la humedad libre crítica al final del periodo de velocidad constante de secado. Como también es la misma tendencia exhibida por la humedad libre crítica en el punto de inflexión en el período de velocidad descendente. Nuevamente la muestra original se ubicó como una muestra entre 6 y 10 mesh respecto a las humedades críticas antes mencionadas. Estos resultados son consecuencia de la prolongación del período a velocidad constante de secado con el decrecimiento del tamaño de las partículas, discutidos anteriormente (tabla 4.5).

Tabla 4.7. Humedades libres críticas para los períodos de secado a diversas granulometrías

MUESTRA (<i>mesh</i>)	HUMEDAD LIBRE CRITICA (kg agua/kg ss)	
	PERIODO A VELOCIDAD CONSTANTE	PERIODO A VELOCIDAD DECRECIENTE (EN PUNTO DE INFLEXION)
	Original	0,02375
6 (3360 μm)	0,03250	0,028000
10 (1680 μm)	0,021862	0,019821
16 (1000 μm)	0,014654	0,012587
-16 (<1000 μm)	0,014638	0,012573

Pérdidas de humedad para las diferentes granulometrías

Las pérdidas de humedad experimentadas por las muestras de mineral de diversas granulometrías, durante los períodos a velocidad de secado constante y a velocidad de secado decreciente (primer y segundo períodos postcríticos), se muestran de manera resumida en la tabla 4.8. En primer lugar, es notorio el efecto ejercido por la disminución del tamaño de las partículas en cada muestra, según la abertura de mallas (*mesh*) de cada tamiz, sobre la pérdida del contenido de humedad de los sólidos en los períodos de secado tanto a velocidades constante como decreciente.

Durante el período de secado a velocidad constante, las pérdidas de humedad de los sólidos (respecto a sus humedades iniciales) aumentaron con la disminución de los tamaños de las partículas de cada muestra. Dichas pérdidas resultaron mínimas (45,95%) para los sólidos correspondientes a la abertura de malla de 3360 μm (6 *mesh*); y fueron creciendo con la disminución de los tamaños de partículas de las fracciones de sólidos, hasta alcanzar 75,15%, en el caso de partículas de 1000 μm (16 *mesh*). Este fenómeno puede interpretarse el efecto del crecimiento del área superficial total de las partículas más pequeñas por unidad de volumen. Esta área es la misma a través de la cual ocurre la transferencia simultánea de calor y de masa alrededor de la masa de partículas sólidas en cada muestra.

Tabla 4.8. Pérdidas de humedad para las diferentes granulometrías, durante los períodos de secado.

MUESTRA (<i>mesh</i>)	PERDIDA DE HUMEDAD (%)		
	PERIODO A VELOCIDAD CONSTANTE	PERIODO A VELOCIDAD DECRECIENTE	
		I POSTCRITICO	II POSTCRITICO
Original	56,80	12,77	30,43
6 (3360 μm)	45,95	13,89	40,16
10 (1680 μm)	63,58	9,33	27,09
16 (1000 μm)	75,15	14,11	10,74
-16 (<1000 μm)	73,90	14,11	11,99

La pérdida de humedad (56,80%) exhibida por la mezcla original de sólidos granulares, se ubicó entre los valores de las pérdidas arrojadas por las muestras correspondientes a aberturas de malla ente 3360 μm y 1680 μm . Por su parte, el caso de la muestra con partículas de -16 *mesh* (<1000 μm) reveló una pérdida de humedad un poco menor (73,90%). Esto podría haber sido consecuencia del efecto detrimental que para la evaporación de la humedad durante el secado a velocidad constante, pudo haber ejercido la compactación de

los sólidos muchos más finos que predominan en esta última porción tamizada del mineral de hierro.

Por otra parte, las variaciones de las pérdidas de los contenidos de humedad de cada una de las muestras arriba mencionadas, en el período de velocidad de secado decreciente, y que incluye los dos períodos postcríticos de secado, también se presentan en la tabla 4.5.

En el primer período postcrítico, de duración breve, la tendencia de las pérdidas de humedad en relación con la disminución del tamaño (o incremento del área superficial total) del material particulado, no reveló una variación significativa (entre 12,77% y 14,11%), excepto para la muestra de 10 *mesh* (1680 μ m) en la cual la humedad perdida sólo alcanzó 9,33%. Este comportamiento lineal es compatible con una cubierta exterior porosa en las partículas, a través de la cual el agua es retirada por mecanismo de difusión, en cantidades porcentuales independientes respecto a la disminución del tamaño o al aumento del área superficial total de las partículas.

En contraste, el segundo período postcrítico de naturaleza no lineal y de mayor duración, la dependencia de la pérdida de humedad respecto a la disminución del tamaño (o aumento del área superficial total) del material particulado, fue inversa u opuesta, en comparación con la observada en el primer período postcrítico. Esto parece confirmar la apreciación antes mencionada, de que en esta segunda fase postcrítica el sólido presenta mayor dificultad para ceder la humedad no ligada y poca capacidad para reponer el agua desde el interior del sólido, más compacto, consolidado y de escasa porosidad interna de las partículas del mineral de hierro. Adicionalmente, se reveló que la cantidad de humedad porcentual cedida por la muestra original en este segundo período postcrítico, se ubicó en la pérdida de humedad correspondiente al intervalo de tamaños de partículas 1680-3360 μ m, como también ocurrió durante el período de velocidad de secado constante.

4.5 ELABORACIÓN DE BALANCES DE MASA Y DE ENERGÍA EN EL SECADOR DE MINERAL DE HIERRO MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO.

Los resultados arrojados por la hoja de cálculo programada para una corrida típica de operación, del secador de lecho fluidizado que opera en Orinoco Iron C.A. se muestran en la figura 4.11. Los flujos volumétricos de gas fueron convertidos a velocidades de flujo molar. La velocidad de flujo molar de aire para combustión (1275,54 kmol/h) supera 11:1 a la del gas natural (115,71 kmol/h); mientras que como ya se ha mencionado, esta velocidad para el gas de fluidización permanece fija (5803,57 kmol/h). Consecuentemente el oxígeno está en exceso en un 13,43 %, como era de esperarse para garantizar combustión completa. Es importante destacar la ausencia para esta corrida del gas de bajada (*let down gas*), por no encontrarse disponible en operación al momento de tomar los datos de la sala de control de la planta.

Mediante cálculos de balances de masa se caracterizó el gas de fluidización que circula a través del secador, en cuanto a su composición másica y porcentual. El cambio más notorio corresponde a la cantidad de vapor de agua retirada del mineral de hierro, la cual supera en aproximadamente cuatro veces el valor de la cantidad de agua entrante al secador (9674,04 kg/h para la entrada y 38186,83 kg/h para la salida), equivalente al 15,83 % de humedad a la salida de la mezcla gaseosa. Esto se atribuye a la procedencia diversa del vapor de agua (la que se genera en las reacciones de combustión más la que se evapora de los sólidos). Los demás gases (CO_2 , O_2 y N_2) mantienen constantes sus flujos másicos respectivos durante su recorrido en el secador (6470,7 kg/g, 40014,62 kg/h y 156589,85 kg/h, respectivamente). Estos valores en fracciones másicas y en términos porcentuales también se muestran en la figura 4.11.

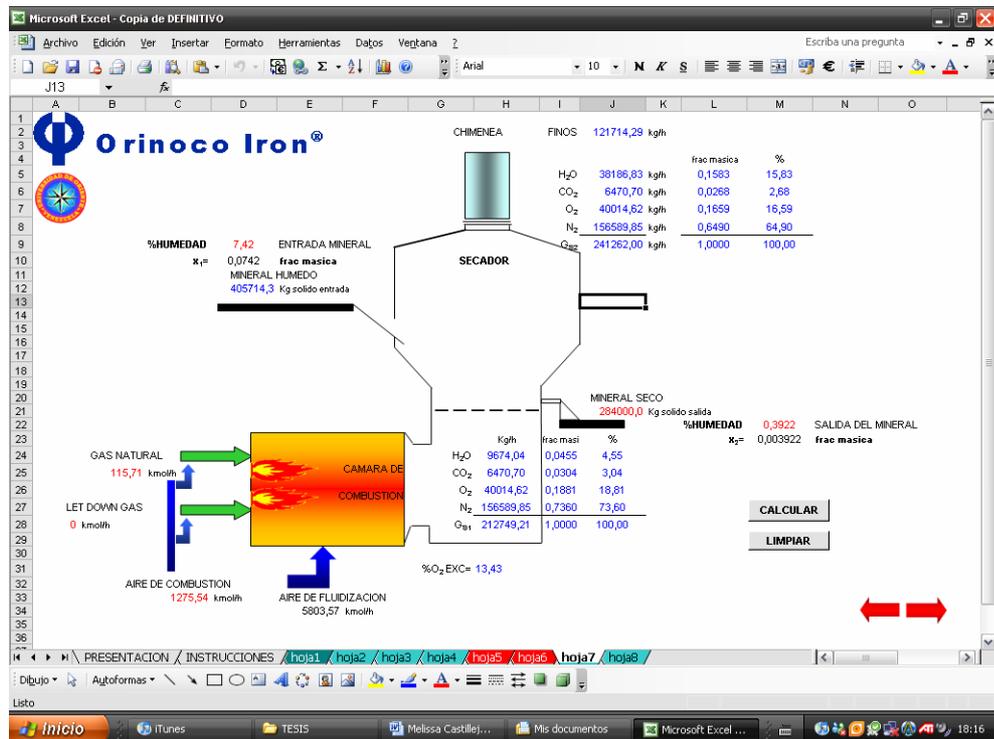


Figura 4.11: Diagrama de resultados del balance de masa arrojados por la hoja de cálculo, que simula el comportamiento del secador de lecho fluidizado.

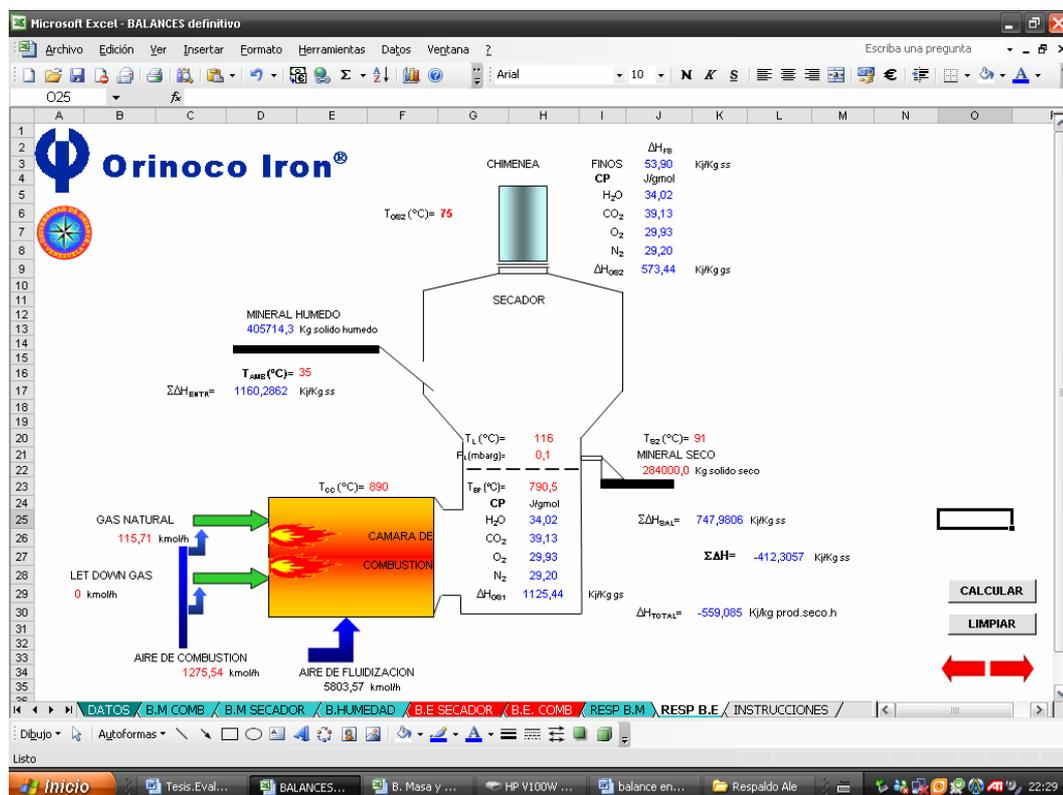


Figura 4.12: Diagrama representativo de los resultados del balance de energía arrojados por la hoja de cálculo que simula el comportamiento del secador de lecho fluidizado presente en Orinoco Iron.

Por otra parte, transversalmente ingresa el mineral de hierro húmedo (405714,3 kg/h) con una humedad de 7,42 %, y sale del secador a 284000 kg/h con su humedad disminuida hasta 0,3922 %. Adicionalmente, es de notar la pérdida importante de finos de mineral de hierro (121714,29 kg/h).

Para el balance de energía se tiene para el sólido alimentado al secador una entalpía de 1160,2862 KJ/kg ss, mientras que para el sólido a la salida del secador la entalpía es de 747,9806 KJ/kg ss. La energía debe ser transferida o absorbida hacia o desde los alrededores. La diferencia de entalpías (entrada y salida) arrojó un valor negativo (-412,3057 KJ/kg ss) que reveló que se trata de un sistema endotérmico, es decir el sistema absorbe energía desde el quemador.

La entalpía total necesaria para secar un kilogramo de mineral fue de - 559,085 KJ/kg prod.seco.h, como factor referencial de cuanta energía se requiere

suministrar para secar un kilogramo de mineral y de esta manera poder realizar estimaciones para una cantidad específica de mineral.

CONCLUSIONES

1. En la distribución de tamaños de partículas de la muestra del mineral de hierro alimentado al secador de lecho fluidizado, la población predominante correspondió a aquellas con diámetro promedio de $618,5\mu\text{m}$ (26,57% de la masa total de sólidos), como parte de la porción másica con las partículas más pequeñas (56,7%).
2. Las propiedades físicas del mineral procesado en el secador industrial arrojaron los siguientes resultados: densidad a granel ($1966,9\text{ kg/m}^3$); porosidad (0,4266); densidad aparente (3375 kg/m^3); diámetro promedio base área ($269,1\mu\text{m}$) y diámetro base volumen ($2588,18\mu\text{m}$); por lo tanto, la mezcla de partículas sólidas contiene una amplia variabilidad granulométrica (heterogénea).
3. El compuesto predominante en el mineral de hierro es la hematita (Fe_2O_3), con un contenido de 94,05% m/m; seguido de agua ligada con 3,83%; óxido de silicio (SiO_2) 1,04%; alúmina (Al_2O_3) 0,79%; fósforo 0,065%; azufre 0,024%; óxido de calcio (CaO) 0,05% y óxido de magnesio (MgO) 0,01%.
4. Las propiedades densidad y viscosidad del gas de fluidización resultaron ser $2,07 \times 10^{-5}\text{ kg/m}^3$ y $1,6654\text{ kg/m.s}$, respectivamente, a las condiciones medias mensuales de temperatura y presión de 116°C y $0,98\text{ atm}$, respectivamente.
5. A la velocidad de operación del gas de fluidización en el secador industrial ($5,7467\text{ m/s}$), las fluidizaciones para las partículas de diámetro promedio más pequeño ($73,5\mu\text{m}$) y para las más grandes ($12700\mu\text{m}$) ocurrieron a las

velocidades mínimas de fluidización de 0,0053 m/s y 3,2189 m/s, respectivamente; y aquellas con diámetros promedios superiores a 1000 μ m opusieron mayor resistencia a la fluidización por efecto de las fuerzas gravitacionales.

6. Las partículas con diámetros promedios entre 73,5 y 940 μ m resultaron arrastradas por el gas de fluidización; pero aquellas con tamaños mayores que 940 μ m permanecieron fluidizadas en el secador.
7. En el lecho las partículas fluidizan como arena, de acuerdo al grupo B según la clasificación de Geldart [6], con formación de burbujas de gran tamaño que podrían hacer deficiente el contacto gas-sólido; y el régimen de fluidización del secador industrial correspondió a un estado de *transición a lecho turbulento*, según Grace [7].
8. El período de secado a velocidad constante para las muestras de sólidos tamizados, aumentó con la disminución del tamaño de las aberturas de malla que retuvieron a las partículas.
9. Los períodos de velocidad decreciente para los sólidos de las distintas granulometrías, todos arrojaron resultados similares de una hora (1 h) aproximadamente, durante el primer período postcrítico, donde las caídas lineales de las velocidades de secado fueron cortas, y las humedades internas de las partículas eran retiradas mediante el mecanismo de difusión.
10. En un segundo período postcrítico (no lineal) fue evidente que el secado de los sólidos presentó mayor dificultad, con predominancia de un mecanismo capilar para la migración de la humedad al exterior, y/o tortuoso en el interior de las partículas más compactas, o de los aglomerados conformados por las partículas más finas.

11. El incremento del flujo másico del gas de fluidización a la salida del secador es compatible con la cantidad de humedad retirada del mineral de hierro, el cual supera en aproximadamente cuatro veces la cantidad de agua entrante al secador (9674,04 kg/h a la entrada y 38186,83 kg/h a la salida).
12. Se tuvo como resultado que se requiere 559,085 Kj/kg prod.seco.h para reducir la humedad de 1 kilogramo de mineral de hierro desde 7,42 % b.h hasta 0,3922 % b.h.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar velocidades superficiales máximas del gas, menores a los valores estimados de las velocidades terminales de partículas.
2. Asegurarse de que el mineral alimentado al secador sea lo más homogéneo posible.
3. Evitar durante la preparación del mineral, el llenado del tamiz superior que compone la batería de tamices con la muestra del mineral, para que no se aglomeren los sólidos e impedir que el tamizado resulte deficiente.
4. Seleccionar tamices de abertura apropiada y suficiente durante la preparación del mineral, que eviten la obstrucción de los tamices de aberturas pequeñas por el material mineral particulado y faciliten el tamizado.
5. Mantener el mineral en recipientes herméticos para evitar que pueda absorber humedad desde el medio ambiente, cuando se recoge la muestra de sólidos en el área de secado.
6. Incorporar en los balances de masa y de energía, otro(s) parámetro(s) o dato(s) cuantificado(s) y usualmente desconocido(s), para mayor confiabilidad; por ejemplo: alimentación del mineral y porcentaje de finos arrastrados en el secador de lecho fluidizado.

BIBLIOGRAFIA

1. Orinoco Iron, “Descripción del proceso FINMET”. Puerto Ordaz (2007).
2. Molina, K. “Balance de masa y energía del gas en un secador de lecho fluidizado”. Gerencia de Producción. Puerto Ordaz (2005).
3. Orinoco Iron, “Mineral & producto”. Gerencia de Producción. Puerto Ordaz (2007).
4. (1973). Ramos, E., Orinoco Iron “Guía de adiestramiento mineral & producto”. Área Funcional de Mineral y Producto, Gerencia de Producción, Puerto Ordaz (2007).
5. Álvarez, M., “Evaluación hidrodinámica del comportamiento del lecho fluidizado de los reactores del proceso FINMET”. Tesis de grado, Universidad Simón Bolívar, coordinación de Ingeniería Química. Sartenejas Enero (2005).
6. Geldart, D. “Types of gas fluidization”, Power Technology, 7,285-292, (1973).
7. Kunii y Levenspiel O., “Fluidization engineering”. Editorial Butterworth-Heinemann. Segunda edición, EUA (1969).
8. Perry J., “Chemical Engineers Handbook”. Editorial McGraw Hill, tomo I. (1999).
9. Treybal, R. “Operaciones de Transferencia de Masa”. Editorial McGraw Hill. Segunda edición, México (2004).

10. McCabe W. y Smith J., “Operaciones unitarias en ingeniería química”. Editorial Mc Graw Hill. Sexta edición, México (2004).
11. Foust, A., “Principios de operaciones unitarias”. Editorial Continental. Segunda edición, México (1997).
12. Chang, R. “Química”. Editorial McGraw Hill. Sexta edición, México (1999).
13. Himmelblau, D. “Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química”. Editorial Prentice Hall. Sexta edición, México (2002).
14. Reactor Engineering and Catalytic Technologies, Inc. (RECAT). Technical Report prepared for Orinoco Iron, Venezuela. London, Ontario, Canada (2007).
15. Márquez, L., “Evaluación del funcionamiento de los secadores de lecho fluidizado en una empresa metalúrgica”. Tesis de grado, Universidad de Oriente, departamento de Ingeniería Química. Puerto la Cruz Julio (2001).
16. Maldonado, R.J. y E. Pacheco-Delahaye. Curvas de deshidratación del brócoli (*Brassica oleraceae* L var. *Italica* Plenck) y coliflor (*Brassica oleraceae* L var. *Botrytis* L). *Revista de la Facultad de Agronomía*, 20: 306-319 (2003).

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO:**

TÍTULO	“EVALUACION DE PARAMETROS FLUIDODINAMICOS Y DE LAS CARACTERISTICAS BASICAS DE SECADO DEL MINERAL DE HIERRO UTILIZADO EN EL PROCESO FINMET®”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
CASTILLEJO M. MELISSA S.	CVLAC: 17.446.465 EMAIL: melissacastillejo@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Evaluación, Parametros, fluidodinamico, hierro.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
<u>Ingeniería y ciencias aplicada</u>	<u>Ingeniería Química</u>

RESUMEN (ABSTRACT):

Se presenta una evaluación de los parámetros fluidodinámicos y características de secado de mineral de hierro en lecho fluidizado en la planta Orinoco Iron; para realizar la caracterización del mineral alimentado al secador y del gas de fluidización; determinar parámetros y características del lecho fluidizado; el efecto de la granulometría de los sólidos de alimentación al secador sobre las características de secado y las curvas de deshidratación de los sólidos; y elaborar balances máscicos y energéticos. Mediante la aplicación de métodos estandarizados de análisis físicos y químicos, y cálculos con modelos matemáticos, los resultados revelaron que en los sólidos alimentados al secador predominaron las partículas con diámetro promedio 618,5 μ m (26,57%). Se reportan la densidad a granel y aparente, porosidad, diámetros promedios de base área y volumen, confirmándose su heterogeneidad; y contenidos de 94,05% m/m de hematita, agua ligada (3,83%). Se presentan la densidad y viscosidad del gas de fluidización a condiciones medias de temperatura (116 °C) y presión (0,98 atm). A la velocidad operacional del gas de fluidización, las partículas con $dp_{prom} > 1000\mu m$ ofrecen mayor resistencia al flujo. Las partículas con $73,5 < dp_{prom} < 940\mu m$ resultan arrastradas por el gas; pero las de tamaños $> 940\mu m$ permanecen *fluidizadas como arena*, según Geldart [6], en el secador, bajo régimen de fluidización en *transición a lecho turbulento*. El secado de los sólidos confirmó la presencia de tres periodos: velocidad de secado constante y dos posteríticos. La velocidad de secado no cambió significativamente con la reducción de tamaños de partículas. Los balances revelaron una humedad de 15 % y un requerimiento energético de - 559,08 Kj/kg producto.h.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS-X	TU	JU
ALVAREZ, LUCAS	CVLAC:	12.456.765			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
OBANDO, YANEIS	ROL	CA	AS	TU	JU-X
	CVLAC:	10.342.198			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
SILVA, HECTOR	ROL	CA	AS	TU	JU-X
	CVLAC:	8.567.098			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	03	23
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE: SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis.Evaluacion de Parametros.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A
 B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g
 h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.
 ALCANCE

ESPACIAL: FINMET (Departamento químico) (OPCIONAL)

TEMPORAL: 3 meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pre-Grado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**DERECHOS**

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado

“Los Trabajos de Grado propiedad exclusiva de la

Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para

otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo

respectivo, quién lo participará al Consejo Universitario”.

AUTOR 1

CASTILLEJO M. MELISSA S

AUTOR 2

AUTOR 3

TUTOR

LUCAS ALVAREZ

JURADO 1

YANEIS OBANDO

JURADO 2

HECTOR SILVA

POR LA SUBCOMISION DE TESIS
