

Índice

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN	2
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA.....	4
1.4 OBJETIVOS.....	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 RESULTADOS ESPERADOS	5
1.6 METODOLOGÍA	5
1.6.1 Primera fase.....	5
1.6.2 Segunda fase.....	6
1.6.3 Tercera fase	6
1.6.4 Cuarta fase.....	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	8
2.1 MÉTODOS DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS	9
2.2 SISTEMAS ÓPTICOS MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN ..	10
2.2.1 Ley de Lambert-Beer:	11
2.2.2 Área específica de extinción	11
2.2.3 Tamaño de partículas en función de variables ópticas.....	12
2.2.4 Centrífuga de foto sedimentación	12
2.3 REPRESENTACIÓN DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS	13
2.3.1 Diámetro representativo	15
2.4 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS	17
2.4.1 Velocidad de sedimentación terminal	19
2.4.2 Campo de fuerza centrifugo	20

2.4.3	Fuerza centrífuga.....	21
2.4.4	Fuerza de flotación.....	22
2.4.5	Fuerza de arrastre	22
2.4.6	Influencia trayectoria radial.	23
2.4.7	Fuerza de Coriolis	24
2.4.8	Área transversal de la partícula	24
2.4.9	Número de Reynolds	24
2.4.10	Número de Arquímedes	25
2.4.11	Coefficiente de arrastre.....	25
2.4.12	Factor de incremento de aceleración gravitacional	26
2.4.13	Factor de dinámico de forma.....	27
2.4.14	Factor de esfericidad	28
2.4.15	Velocidad terminal de sedimentación de la partícula en función al número de Reynolds y Arquímedes.....	28
2.4.16	Velocidad de Stokes cuando la partícula está sometida a campos centrífugos	29
2.5	FACTORES DE CORRECCIÓN DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN	29
2.5.1	Factor de reducción de velocidad de sedimentación ecuación de continuidad para sistemas monomodales de partículas.	30
2.5.2	Factor de reducción de velocidad de sedimentación de Richardson & Zaki para sistemas monomodales de partículas	30
2.5.3	Factor de reducción de velocidad de sedimentación de Brauer & Kriegel para sistemas monomodales de partículas.	31
2.6	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN CORREGIDA.....	32
2.7	ENFOQUE EMPÍRICO PARA DESCRIBIR LA DEPENDENCIA DE LA CONCENTRACIÓN.....	32

2.8 TIPOS DE ERRORES EXPERIMENTALES	33
2.8.1 Error relativo porcentual	34
2.9 METODO DE MÍNIMOS CUADRADOS.....	34
CAPÍTULO 3: DESARROLLO A LA SOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	36
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PARTÍCULAS	38
3.2 DESCRIPCIÓN DE EQUIPO SHIMADZU SA-CP3	39
3.3 METODOLOGÍA DEL ENSAYO PARA LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS.....	40
3.3.1 Balanza de laboratorio.....	40
3.3.2 Preparación de suspensiones:.....	41
3.3.3 Ultra-turrax.....	41
3.3.4 Ultrahomogeneizador vibra-cell VCX500	41
3.3.5 Agitador magnético	41
3.3.6 Shimadzu SA-CP3.....	41
3.4 METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA PROCESAR LOS DATOS	42
3.5 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE MICROPARTÍCULAS GELTECH 1,543	
3.6 CÁLCULO DE VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN	51
3.6.1 Cálculo de velocidad de sedimentación teórica	51
3.6.2 Cálculo de velocidad de sedimentación Geltech 1,5 (experimental)	52
3.7 CÁLCULO DE FACTORES DE CORRECCIÓN DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN TEÓRICA.....	52
3.8 CORRECCIÓN DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN TEÓRICA	55
3.9 ERROR ENTRE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN EXPERIMENTAL Y VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN TEÓRICA CORREGIDA.....	56
3.10 TENDENCIA DEL FACTOR DE CORRECCIÓN RESPECTO LA CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA	59

3.10.1	Factor de corrección de Richardson & Zaki.....	59
3.10.2	Factor de corrección de la ecuación Brauer & Kriegel	60
3.10.3	Factor de corrección de la ecuación de continuidad	61
3.10.4	Tendencia del sistema de micropartículas Geltech 1,5 (experimental).....	62
3.11	ENFOQUE EMPÍRICO PARA DETERMINAR EL VALOR DEL EXPONENTE “N” DE LA FUNCIÓN DE CORRECCIÓN EXPERIMENTAL.....	65
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS		68
4.1	SISTEMA MONOMODAL GELTECH 1,5.....	64
4.2	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN	65
4.3	DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO	66
4.4	VALIDEZ DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN TERMINAL	67
4.5	ANÁLISIS DEL FACTOR DE CORRECCIÓN PROPUESTOS RESPECTO DE LA CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA	67
4.6	ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN DE CORRECCIÓN EXPERIMENTAL.....	68
4.7	ANÁLISIS EXPONENTE FUNCIÓN DE CORRECCIÓN EXPERIMENTAL.....	70
CONCLUSIONES		71
BIBLIOGRAFÍA		74
APÉNDICE		75
A.	DATOS DE LOS ENSAYOS DE MEDICIÓN	76
A1.	<i>Ensayo sistema de partículas Geltech 1,5</i>	76
B.	DESVIACIÓN ESTADÍSTICA	80
C.	FACTOR DE CORRECCIÓN RESPECTO LA CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA.....	82
D.	DATOS SATISFACTORIOS PARA FACTOR DE CORRECCIÓN SISTEMA GELTECH 1,5.....	86

E. FUNCIÓN DE CORRECCIÓN EXPERIMENTAL	88
F. DATOS TÉCNICOS DE EQUIPOS DE LABORATORIO UTILIZADOS	93
F1. Homogeneizador dispensador Ultra-turrax.....	93
F2. Homogeneizador ultrasónico vibra-cell VCX 500	94
F3. Agitador magnético RH digital.....	94
G. CÁLCULOS.....	96
G.1 Datos	96
G.2 Cálculo velocidad de sedimentación Geltech 1,5 (experimental).....	96
G.3 Cálculo de la velocidad de sedimentación teórica	97
G.4 Cálculo de factores de corrección	98
G.5 Corrección de la velocidad de sedimentación teórica corregida por los distintos factores de corrección	102
G.6 Error relativo de predicción	107

Índice de tablas

Tabla 2.1 Clasificación de analizadores centrífugos. Fuente: Powder Sampling and size sedimentation.....	10
Tabla 2.2 Tabla para la obtención de constantes A y B en función de los números de Reynolds y Arquímedes. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen suspensionen, salinas, 2007.....	26
Tabla 2.3. Formula empírica factor de forma. Fuente: Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Schubert, 2003.....	27
Tabla 2.4. Valores que adopta el exponente según el número de Reynolds. (Salinas Salas, Apuntes de tecnología energética y descontaminación, 2009).....	31
Tabla 3.1 Diámetros representativos según equipos de medición estándar de sistemas de partículas. Fuente: (Salinas Salas , Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen suspensionen,2007.....	38
Tabla 3.2 Datos iniciales del ensayo centrifugo de micropartículas Geltech 1,5 Fuente: elaboración propia a partir de datos tomados por la centrifuga analítica Shimadzu SA-CP3,MVT-TU Dresden.....	43
Tabla 3.3 Datos satisfactorios para establecer el comportamiento del sistema de partículas Geltech 1,5. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MTV-TU Dresden.....	43
Tabla 3.4 Formato ensayos realizados. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	44
Tabla 3.5 Desviación estándar de los datos Geltech 1,5 a 750 rpm. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	48
Tabla 3.6 Diámetro representativo del sistema de partículas Geltech 1,5 a 750 rpm. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3 SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	49
Tabla 3.7 Velocidad de sedimentación experimental para distintos niveles de concentración volumétrica. Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados.....	52
Tabla 3.8 Factores de corrección de velocidad de sedimentación de la ecuación de Brauer & Kriegel, a distintos niveles de concentración volumétrica. Fuente: Elaboración propia a partir	

de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	53
Tabla 3.9 Factores de corrección de velocidad de sedimentación de la ecuación de Richardson & Zaki, a distintos niveles de concentración volumétrica. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	54
Tabla 3.10 Factores de corrección de velocidad de sedimentación de la ecuación de Brauer & Kriegel, a distintos niveles de concentración volumétrica. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	54
Tabla 3.11 Velocidad teórica corregida por el factor de corrección de Bruer & Kriegel. Fuente: Elaboración propia.....	55
Tabla 3.12 Velocidad teórica corregida por el factor de corrección de Bruer & Kriegel. Fuente: Elaboración propia.....	55
Tabla 3.13 Velocidad teórica corregida por el factor de corrección de Bruer & Kriegel. Fuente: Elaboración propia.....	56
Tabla 3.14 Error asociado a cada punto de medición experimental, el cual está definido por la concentración. Fuente: Elaboración propia.....	57
Tabla 3.15 Error asociado a cada punto de medición experimental, el cual está definido por la concentración. Fuente: Elaboración propia.....	57
Tabla 3.16 Error asociado a cada punto de medición experimental, el cual está definido por la concentración. Fuente: Elaboración propia.....	58
Tabla 3.17 Error promedio asociado a cada factor de corrección de velocidad de sedimentación teórica,, el cual está definido por la concentración. Fuente: Elaboración propia.....	58
Tabla 4.1 Comparación de velocidad experimental y velocidad de sedimentación teórica. Fuente elaboración Propia.....	65
Tabla 4.2 Diámetro medido experimentalmente y diámetro medido por espectrómetro laser. Fuente: elaboración propia.....	66

Índice de ilustraciones

Ilustración 2.1. Centrifuga de foto sedimentación. Fuente: Classification and sedimentation methods.....	13
Ilustración 2.2 Diagrama cuerpo libre partícula sometida a fuerzas del campo gravitatorio. (Elaboración propia).....	18
Ilustración 2.3 Diagrama cuerpo libre cuando las partículas están sometidas a los efectos de un campo centrífugo. (Elaboración propia).....	20
Ilustración 2.4 Perfil de concentración y curso temporal de la sedimentación de partículas monomodales en el sistema de campo centrífugo. Fuente: Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen suspensionen, Salinas, 2007.	23
Ilustración 3.1 Principales componentes de la centrifuga analítica Shimadzu SA-CP3 SA-CP3. Fuente: Salinas-Salas , Sedimentationsverhalten von Submikrometerpartikeln in wässrigen suspensionen, 2007.....	39

Indicie de gráficos

Gráfico 2.1 tendencia del Factor de corrección de la velocidad de sedimentación respecto a la concentración volumétrica. Fuente: Elaboración propia	33
Gráfico 3.1 Distribución acumulativa ensayo N°2 Geltech 1,5 a 750 rpm. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	46
Gráfico 3.2 Distribución incremental del ensayo N°2 Geltech 1,5 a 750 rpm. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	46
Gráfico 3.3 Diagrama de porcentaje de extinción relativa ensayo N°2, Geltech 1,5 a 750 rpm. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	47
Gráfico 3.4 Diagrama acumulativo ensayo N°1, 2 y 3, Geltech 1,5 a 750 rpm. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	47
Gráfico 3.5 Diagrama incremental ensayo N°1, 2 y 3, Geltech 1,5 a 750 rpm. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	48
Gráfico 3.6 Diagrama porcentaje extinción relativo ensayo N°1, 2 y 3, Geltech 1,5 a 750 rpm. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga Shimadzu SA-CP3, MVT-TU Dresden.....	49
Gráfico 3.7 tendencia del factor de corrección de Richardson & Zaki respecto de la concentración volumétrica de micropartículas, para un valor del exponente $n=4,65$. Fuente: Elaboración propia.....	60
Gráfico 3.8 Tendencia del factor de corrección de Brauer & Kriegel respecto de la concentración volumétrica de macropartículas. Fuente: Elaboración propia.....	61
Gráfico 3.9 Tendencia del factor de corrección de la ecuación de continuidad respecto de la concentración volumétrica de micropartículas. Fuente: Elaboración propia	62

Gráfico 3.10 Tendencia del sistema de micropartículas Geltech 1,5, respecto de la concentración volumétrica. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos tomados por la centrifuga analítica Shimadzu SA-CP3.....	63
Gráfico 3.11 Comparación entre los valores del sistema Geltech 1.5, la función de corrección de Richardson & Zaki, Brauer & Kriegel y la ecuación de continuidad. Fuente: Elaboración propia.....	64
Gráfico 3.12 Comportamiento del exponente “n” a partir de los datos Geltech 1,5 (experimentales). Fuente: Elaboración propia a partir de datos que fueran satisfactorios. .	65
Gráfico 3.13 Comparación entre el factor de corrección Geltech 1,5 y el nuevo factor de corrección experimental. Fuente: Elaboración propia.....	67
Gráfico 4.1 Comparación de los factores de corrección, con el sistema de micropartículas Geltech 1,5 (experimental). Fuente: Elaboración propia.....	69