

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO CRUDO-
ARENA EN DISPOSITIVOS DE CONTROL DE SÓLIDOS DE
TIPO PLACA IMPACTO”**

Realizado por:

BR JHONATTAN ALEJANDRO BARRUETA BRITO

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

Barcelona, Julio de 2010.

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO CRUDO-
ARENA EN DISPOSITIVOS DE CONTROL DE SÓLIDOS DE
TIPO PLACA IMPACTO”**

ASESOR ACADÉMICO

Prof Orlando M. Ayala

Barcelona, Julio de 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO CRUDO-
ARENA EN DISPOSITIVOS DE CONTROL DE SÓLIDOS DE
TIPO PLACA IMPACTO”**

El jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:

APROBADO

**Prof. Orlando M. Ayala
Asesor Académico**

**Prof. Carlos Da Silva
Jurado Principal**

**Prof. Simón Bittar
Jurado Principal**

Barcelona, Julio de 2010

RESOLUCIÓN

“Artículo 41” Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo notificará al Consejo Universitario”

DEDICATORIA

En la vida siempre hay personas que de alguna manera siempre te impulsan a mejorar y te motivan a seguir. Es por eso que a esas personas quienes siempre confiaron en mí y me acompañaron, deseo dedicarles este trabajo.

Primeramente a Dios todopoderoso, a quien he entregado mi fe y mi trabajo y quien nunca me ha faltado, llenándome siempre de bendiciones. Que esto sea un tributo en su nombre.

A mi madre, mi hermana, mi “vieja” y mi “muñeca” que lo son todo para mí. Sin duda “las Mujeres de mi vida”. No hay cosa que no haría por ustedes y sin duda son mi tesoro máspreciado.

A mi Papá, para quien espero que esto sea una muestra de que siempre he valorado su confianza y su apoyo.

Al resto de mi familia, que son parte indispensable en esta historia y que han sido fuente importante en mi desarrollo.

A mis “hermanos” Ronny y Lucho, de quienes espero que en este trabajo vean reflejado que el trabajo en equipo y la constancia siempre trae sus frutos.

A Geraldine Viña quien ha estado conmigo en todo momento durante este proceso y quien jamás ha dudado de mí. Te amo

A mis alumnos, que esto sea prueba que con perseverancia y la disciplina todos los sueños pueden alcanzarse.

Y recordando siempre que:

“El que no vive para servir, no sirve para vivir” **Teresa de Calcuta**

“Cuando se desea algo con el corazón, el universo conspira para hacerlo realidad” **Paolo Coelho**

AGRADECIMIENTOS

Este logro no hubiera sido posible sin la invaluable colaboración de muchas personas que, de alguna manera me han permitido crecer tanto personal como profesionalmente. Personas de las cuales aprendí y que siempre estuvieron dispuestas a darme una mano en los momentos que más lo necesité. Personas que confiaron en mí y quienes fueron y siguen siendo mi mayor motivación.

A mis Padres, Milagros y Rafael que supieron orientarme en todo momento, que me dieron las herramientas para ser lo que hoy en día soy. Gracias por darme la vida y por ser la columna en la cual me he apoyado a lo largo de todo este camino. Los quiero demasiado y representan muchísimo en mi vida.

A mi “Vieja” Rosa Peinado, que mas que mi tía eres como una madre para mi, gracias por darme todo el cariño y el apoyo en los momentos que más lo necesité. Gracias por quererme como un hijo y por permitirme sentirte como una madre. Te quiero vieja, más de lo que se puede explicar con palabras. A mi “Muñeca” Dolores Peinado, quien al igual que mi “vieja” me dió ese calor de hogar durante los primeros años de mi vida y brindándome muestras de ese cariño desinteresado que muy pocas personas pueden ofrecer.

A mi “Herma” Jessica Barrueta, que sin saberlo es mi mayor inspiración y motivación. Te quiero como no tienes idea y eres el ser más importante de mi vida. Gracias por alegrarme siempre los días con tus ocurrencias.

A mis Abuelas Ninfa y Carmen quienes siempre estuvieron para apoyarme en todo momento a pesar de la distancia. Sin su ayuda nada de esto fuera realidad.

A Jesús Ballena y Ronny Rondón, que más que compañeros fueron como hermanos para mí. Gracias por permitirme aprender de ustedes como tanto a nivel académico como personal y por estar ahí siempre que los necesité. Sin ustedes el camino hubiera sido más difícil de recorrer.

A Geraldine Viña, a quien le debo tantas cosas, me ayudaste a crecer y madurar en muchos ámbitos de mi vida. Tu apoyo y tu confianza fueron claves en momentos difíciles. Gracias por amarme como lo has hecho y por darme todos los días un motivo para sonreír. Te Amo Princesa.

Al profesor Orlando M. Ayala, que más que un excelente profesor, fue un guía y un amigo. Siempre dispuesto a ayudar y de quien aprendí muchas cosas a nivel académico y como persona. Simplemente un ejemplo a seguir.

A Romer Marcano, quien me ha apoyado incondicionalmente como un hermano. Sin duda un miembro más de mi familia.

A Athina Martínez y Jahhaira Ospina, en quienes encontré dos buenas amigas. Siempre dispuestas a ayudar y quienes se merecen todo el éxito del mundo pues son grandes y bellas personas.

A Ysa, Fatty, “al Gordo Estúpido”, Angel, “El chino”, al 3-3, Desiré, Isaias, Luisana, Cristina, Vilma, Estefanía, a Albis y sus ardillas, Dorila, Lian, Silvia, “al indio”, Karina, Yefrid, Robert, al “Team Huele a Miche”, Scott, Ronald, Reinaldo, , y muchos otros con quienes compartí innumerables momentos de alegría y quienes hicieron de este camino algo especial, irrepetible e inmejorable.

A Emilys y Rocío, quienes me enseñaron que de la persona que menos lo esperas siempre puedes aprender y que “la paciencia es un árbol que tiene raíces

amargas pero da frutos dulces". Simplemente bellas personas que sin querer han dejado importantes huellas en mi.

RESUMEN

En la presente investigación se muestra el estudio del comportamiento de un flujo bifásico de crudo y arena que pasa por un equipo de control de sólidos de tipo placa impacto usando como herramienta un software comercial de dinámica de los fluidos computacional. El modelo corresponde al mismo prototipo previamente estudiado por Andueza (2006)^[1]. Las partículas de arena se movilizan por el efecto del fluido sobre ellas y por causa de la gravedad. Para estudiar la interacción de la arena sobre el crudo, se manejaron 9 tamaños de partículas utilizando dos modelos de simulación: el primero, conocido como modelo de acoplamiento en una dirección (One Way Coupling; i.e, sin influencia de las partículas sobre el fluido) y el segundo, el modelo de acoplamiento completo (Fully Coupled; i.e, con influencia de las partículas sobre el fluido). La intención de usar ambos modelos es comparar los resultados de porcentaje de remoción de arena y caída de presión entre ellos. Así mismo se estudió el efecto de la fracción volumétrica de arena sobre la caída de presión y la remoción. Se observaron tres (3) regiones de comportamiento que adoptaban las partículas según su tamaño; la primera región donde predominaba el efecto del flujo sobre ellas, la segunda en la cual se combina el efecto del peso e inercia de las partículas y una tercera zona caracterizada por el predominio de la gravedad. Además se marcó una tendencia de aumento de la remoción mientras se incrementaba la fracción volumétrica de arena. También pudo determinarse que la caída de presión en el equipo es sensible a los cambios de la fracción volumétrica cuando se trabaja en la modalidad de “Fully Coupled”.

INDICE

| | |
|--|-----|
| RESOLUCIÓN | iv |
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTOS | vii |
| RESUMEN..... | x |
| INDICE | xi |
| INDICE DE TABLAS | xiv |
| INDICE DE FIGURAS..... | xvi |
| NOMENCLATURA | xix |
| CAPITULO I..... | 22 |
| INTRODUCCIÓN | 22 |
| 1.1 Planteamiento del Problema..... | 22 |
| 1.2 Objetivos | 24 |
| 1.2.1 Objetivo General | 24 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 24 |
| CAPITULO II | 25 |
| MARCO TEÓRICO..... | 25 |
| 2.1 Antecedentes de la Investigación | 25 |
| 2.2 Fundamentos teóricos..... | 26 |
| 2.2.1 Definición y características de los Hidrocarburos..... | 26 |
| 2.2.2 Principales componentes sólidos e impurezas en el petróleo | 27 |
| 2.2.3 Sistemas de Producción | 28 |
| 2.2.4 Fundamentos básicos de separación..... | 29 |
| 2.2.5 Separación de Sólidos..... | 30 |
| 2.2.6. Ecuaciones de Navier Stokes..... | 31 |
| 2.2.7 Interacción entre Fluidos y Partículas | 32 |
| 2.2.8 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)..... | 34 |

| | |
|--|----|
| 2.2.9 Las matemáticas del CFD..... | 34 |
| 2.2.10 Metodología de CFD | 35 |
| 2.2.10.1 Geometría/Mallado | 36 |
| 2.2.10.2 Definición Física..... | 37 |
| 2.2.10.3 Solucionador | 37 |
| 2.2.10.4 Postprocesador | 38 |
| 2.2.11 Discretización de las ecuaciones que gobiernan los fenómenos fluidodinámicos por el método de Volúmenes Finitos (Discretización numérica) | 39 |
| 2.2.12 Flujo Multifásico y Multicomponente en CFD | 43 |
| 2.2.13 Modelado de Transporte de Partículas | 44 |
| 2.2.14 Flotabilidad..... | 45 |
| 2.2.15 Turbulencia y Modelos de Turbulencia..... | 46 |
| 2.2.16 Modelo de Turbulencia k- ϵ | 48 |
| 2.2.17 Opciones de acoplamiento de Partículas | 49 |
| 2.2.18 Número de Stokes..... | 50 |
| 2.2.19 Número adimensional de Velocidad de Sedimentación..... | 51 |
| CAPITULO III..... | 53 |
| MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO..... | 53 |
| 3.1 Descripción física del modelo | 53 |
| 3.2 Especificación de las propiedades de las fases..... | 54 |
| 3.3 Descripción del modelo matemático aplicado por el software..... | 55 |
| 3.3.1 Modelo Matemático para Flujo Cercano a la Pared | 57 |
| 3.3.2 Esquema de Advección | 60 |
| 3.3.3 Modelado matemático de transporte de partículas | 61 |
| 3.3.4 Transferencia de Cantidad de Movimiento | 62 |
| 3.3.5 Turbulencia en el seguimiento de partículas | 65 |
| 3.3.6 Criterio de convergencia (Residuales)..... | 67 |
| CAPITULO IV..... | 69 |

| | |
|--|-----|
| DESARROLLO DEL MODELO | 69 |
| 4.1 Descripción del modelo utilizado..... | 69 |
| 4.1.1 Dominio de Cálculo..... | 69 |
| 4.1.2 Condiciones de Frontera..... | 70 |
| 4.2 Especificación de las opciones del solucionador | 75 |
| 4.3 Discretización del modelo..... | 76 |
| 4.4 Sensibilidad de la malla..... | 77 |
| 4.4.1 Sensibilidad de malla en términos de velocidad..... | 80 |
| 4.4.2 Sensibilidad de malla en términos de porcentaje de remoción..... | 86 |
| 4.4.2.1 Remoción para 50 partículas de 50 micrones | 86 |
| 4.4.2.2 Remoción para 100 partículas de 200 micrones | 87 |
| 4.4.2.3 Remoción para 100 partículas de 400 micrones | 88 |
| 4.4.2.4 Justificación de la malla seleccionada | 89 |
| CAPITULO V | 91 |
| RESULTADOS Y ANALISIS..... | 91 |
| 5.1 Criterio de Convergencia..... | 91 |
| 5.2 Estudio de la remoción | 92 |
| 5.2.1 Estudio de la remoción para $\phi=0,001$ | 93 |
| 5.2.2 Estudio de la remoción para $\phi=0,0001$ | 109 |
| 5.3 Efecto de la variación de la fracción volimétrica de partículas a la entrada ... | 117 |
| 5.4 Caída de Presión..... | 120 |
| 5.5 Comparación con trabajos anteriores | 125 |
| CAPÍTULO VI..... | 128 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 128 |
| 6.1 Conclusiones | 128 |
| 6.2. Recomendaciones..... | 130 |
| BIBLIOGRAFÍA | 131 |
| METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO..... | 133 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.1 Datos de números de partículas para distintos diámetros con $\phi=0,001$ y un flujo másico de partículas de $0,07918 \text{ Kg/s}$ | 73 |
| Tabla 4.2 Datos de números de partículas para distintos diámetros con $\phi=0,0001$ y un flujo másico de partículas $0,007918 \text{ Kg/s}$ | 74 |
| Tabla 4.3 Características del mallado utilizado | 78 |
| Tabla 4.4 Cantidad de elementos correspondientes por cada escala..... | 80 |
| Tabla 4.5 Valores de velocidad obtenidos en la línea horizontal en m/s | 82 |
| Tabla 4.6 Porcentaje de error con respecto a la malla más fina en la línea horizontal | 83 |
| Tabla 4.7 Valores de velocidad obtenidos en la línea vertical en m/s | 83 |
| Tabla 4.8 Porcentaje de error con respecto a la malla más fina (0,6) en la línea vertical..... | 84 |
| Tabla 4.9 Resultados de remoción obtenidos para 50 partículas de 50 micrones..... | 86 |
| Tabla 4.10 Resultados de remoción obtenidos para 100 partículas de 200 micrones. | 87 |
| Tabla 4.11 Valores de remoción obtenidos para 100 partículas de 400 micrones | 89 |
| Tabla 5.1 Resultados de porcentaje de remoción para diferentes tamaños de partículas para una densidad de flujo másico de entrada $9,83083 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$ en las modalidades de One Way Coupling y Fully Coupled para $\phi=0,001$ | 94 |
| Tabla 5.2 Valores de número de stokes y de velocidad de sedimentación adimensional para todos los tamaños de partículas para una densidad de la partículas de $P=2500 \text{ KG/M}^3$ y un fluido de viscosidad $\mu=0,0011684 \text{ KG/M.S.}$ considerando una velocidad a la entrada de del recipiente de $3,7343 \text{ M/S}$ y un tiempo característico de $0,0003 \text{ s}$ | 100 |
| Tabla 5.3 Resultados de porcentaje de remoción para diferentes tamaños de partículas para una densidad de flujo másico de entrada $0,98308 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$ en las modalidades de One Way Coupling y Fully Coupled para $\phi=0,0001$ | 110 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 5.4 Porcentaje de remoción y características físicas de las partículas para una fracción volumétrica de 0,005 y un flujo másico de 0,396 (Kg/s) y una densidad de flujo másico a la entrada de 49,15 (Kg/s. m ²)..... | 118 |
| Tabla 5.5 Valores de caída de presión y constante K de pérdidas secundarias para distintos tamaños de partículas para una fracción volumétrica de arena de $\phi=0,001$ en Fully Coupled..... | 121 |
| Tabla 5.6 Valores de presión a la entrada y salida del desarenador y caída de presión para distintos tamaños de partículas para una fracción Volumétrica de $\phi=0,0001$... | 123 |
| Tabla 5.7 Cuadro comparativo entre la investigación realizada por Andueza (2006) ^[1] y el presente estudio..... | 127 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 2.1 Vista en corte de un separador de tipo Placa Impacto | 31 |
| Figura 2.2 Líneas de flujo que se forman alrededor de una partícula que se mueve lentamente a través de un fluido en la dirección mostrada ^[9] | 33 |
| Figura 2.3. Superficie del volumen finito | 40 |
| Figura 2.4 Elemento del mallado | 42 |
| Figura 3.1 Vista de la geometría final (volumen de control) | 53 |
| Figura 3.2 Dimensiones del desarenador | 54 |
| Figura 4.1 Regiones donde se asignan las condiciones de borde..... | 71 |
| Figura 4.2 Dominio final con las condiciones de borde definidas..... | 75 |
| Figura 4.3 Mallado generado | 79 |
| Figura 4.4 Efecto de las inflaciones | 79 |
| Figura 4.5 Líneas de velocidad y coordenadas principales..... | 81 |
| Figura 4.6 Porcentaje de error en función a la posición en la línea horizontal | 84 |
| Figura 4.7 Porcentaje de error en función a la posición en la línea vertical | 85 |
| Figura 4.8 Porcentaje de error con 50 partículas de 50 micrones | 87 |
| Figura 4.9 Porcentaje de error con 100 partículas de 200 micrones | 88 |
| Figura 4.10 Porcentaje de error con 100 partículas de 400 micrones | 89 |
| Figura 5.1 Gráfica de convergencia para 10 partículas de 1000 micrones en One Way Coupling..... | 91 |
| Figura 5.2 Gráfica de convergencia para 10 partículas de 1000 micrones en Fully Coupled | 92 |
| Figura 5.3 Área transversal del recipiente con la placa | 97 |
| Figura 5.4 Gráfica comparativa del porcentaje de remoción para diversos tamaños de partículas en One Way Coupling y Fully Coupled para $\phi=0,001$ | 101 |
| Figura 5.5 Comportamiento de las partículas de 30 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 102 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.6 Comportamiento de las partículas de 40 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 102 |
| Figura 5.7 Comportamiento de las partículas de 50 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 104 |
| Figura 5.8 Comportamiento de las partículas de 100 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 105 |
| Figura 5.9 Comportamiento de las partículas de 200 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 106 |
| Figura 5.10 Comportamiento de las partículas de 300 micrones en el desarenador a) Fully Coupled b) One Way Coupling | 106 |
| Figura 5.11 Comportamiento de las partículas de 400 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 107 |
| Figura 5.12 Comportamiento de las partículas de 700 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 108 |
| Figura 5.13 Comportamiento de las partículas de 1000 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 108 |
| Figura 5.14 Gráfica comparativa del porcentaje de remoción para diversos tamaños de partículas en One Way Coupling y Fully Coupled para $\phi=0,0001$ | 111 |
| Figura 5.15 Comportamiento de las partículas de 30 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 112 |
| Figura 5.16 Comportamiento de las partículas de 40 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 112 |
| Figura 5.17 Comportamiento de las partículas de 50 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 113 |
| Figura 5.18 Comportamiento de las partículas de 100 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 114 |
| Figura 5.19 Comportamiento de las partículas de 200 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 114 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.20 Comportamiento de las partículas de 300 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 115 |
| Figura 5.21 Comportamiento de las partículas de 400 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 116 |
| Figura 5.22 Comportamiento de las partículas de 700 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 116 |
| Figura 5.23 Comportamiento de las partículas de 1000 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling..... | 117 |
| Figura 5.24 Gráfica de porcentajes de remoción para diferentes tamaños de partículas y fracciones volumétricas..... | 118 |
| Figura 5.25 Gráfica comparativa de caída de presión para diversos tamaños de partículas en One Way Coupling y Fully Coupled para una fracción volumétrica $\phi=0,001$ | 121 |
| Figura 5.26 Gráfica comparativa de caída de presión para diversos tamaños de partículas en One Way Coupling y Fully Coupled para una fracción volumétrica $\phi=0,0001$ | 123 |
| Figura 5.27 Gráfica de caída de presión en función al diámetro para 100 partículas..... | 125 |

NOMENCLATURA

| | | |
|--------------------|---|---|
| A_C | = | Área proyectada de la partícula. |
| ν | = | Viscosidad cinemática |
| C_D | = | Coefficiente de arrastre. |
| Φ | = | Fracción volumétrica de arena |
| St_{crit} | = | Número de Stokes crítico |
| d_p | = | Diámetro de la partícula. |
| F_D | = | Fuerza de arrastre. |
| g | = | Aceleración de Gravedad. |
| m | = | Masa de la partícula. |
| Re | = | Número de Reynolds. |
| Re_p | = | Reynolds de la partícula. |
| U_i | = | Velocidad en X. |
| U_j | = | Velocidad en Y. |
| St | = | Número de Stokes |
| S_v | = | Velocidad de sedimentación adimensional |
| τ_p | = | Tiempo de respuesta de la partícula |

| | | |
|--------------|---|---|
| T_k | = | Tiempo característico del flujo |
| V_{sed} | = | Velocidad de sedimentación |
| V | = | Volumen |
| V_p | = | Volumen de la partícula. |
| U_{xo} | = | Velocidad que la partícula percibe del fluido |
| X_{pn} | = | Posición de la partícula en el eje X. |
| Y_{pn} | = | Posición de la partícula en el eje Y. |
| μ_f | = | Viscosidad dinámica del fluido. |
| C_μ | = | Constante empírica de turbulencia |
| η | = | Diámetro del Eddy de Kolmogorov |
| ρ_f | = | Densidad del fluido. |
| ρ_p | = | Densidad de la partícula. |
| ρ_{ref} | = | Densidad de referencia (la más baja) |
| S_m | = | Flotabilidad |
| K | = | Energía cinética turbulenta |
| E | = | Disipación del Hedí |
| u_τ | = | Velocidad de fricción |

| | | |
|------------------|---|--|
| y^+ | = | Distancia adimensional desde la pared |
| u^+ | = | Velocidad cercana a la pared |
| U_t | = | Velocidad tangente a la pared |
| Lm | = | Longitud de mezcla |
| V_k | = | Velocidad característica de fluido |
| $\overline{u_x}$ | = | Velocidad promedio |
| H | = | Constante de turbulencia |
| Δ | = | Distancia desde la entrada a la pared |
| DFME | = | Densidad de flujo másico a la entrada |
| DFMS | = | Densidad de flujo másico a la salida |
| A_{ttp} | = | Área transversal total de la partícula |
| A_{ttt} | = | Área transversal total de la tubería |
| RMS | = | Raíz Promedio de los cuadrados |
| Max | = | Máximo residuo del dominio |
| μ | = | Viscosidad dinámica |

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

La historia del mundo contemporáneo se escribe bajo el marco de los hidrocarburos, los cuales, representan las principales fuentes energéticas en el planeta y que han fortalecido el desarrollo tecnológico. En la actualidad, la explotación y producción del petróleo y del gas natural, han evolucionado enormemente en lo relacionado con las técnicas y mecanismos para mejorar la eficiencia y el óptimo aprovechamiento de estos recursos, buscando subsanar las deficiencias del pasado. En este sentido, uno de los grandes problemas que ha enfrentado la industria de los hidrocarburos es que el petróleo y el gas, traen consigo una serie de impurezas de diversos tipos como el agua, arenas de producción y los asfaltenos, que son inconvenientes por varias razones. Primero, aumentan la frecuencia de fallas por desgaste y corrosión en los equipos y reemplazos de válvulas, codos, entre otros accesorios en la planta, que no están diseñados para manejar flujo multifásico y segundo, que esto afecta en el proceso de formación de los derivados, que en sí, son la razón de ser de la producción.

En base a lo antes mencionado, con el tiempo se han desarrollado sistemas de trenes de separación en los cabezales de producción, para ir liberando al crudo de todas esas sustancias indeseadas. Para esto, se han desarrollado con el pasar de los años, distintos dispositivos de manejo de sólidos, destacando los de tipo Ciclón y los de Placa impacto. En nuestro país, muchas estaciones recolectoras de flujo trabajan con dispositivos de manejo de sólidos de tipo placa impacto por su bajo costo y simplicidad. En estos, entra la mezcla de crudo y sedimentos que choca con una placa

deflectora. Esto causa una pérdida de energía y por efecto de diferencia de densidades, las partículas sólidas tienden a salir por la parte baja, mientras que el crudo permanece fluyendo en hacia la zona superior y sale del dispositivo. Sin embargo, este fenómeno depende en gran cuantía de la naturaleza de los sedimentos, de su tamaño, el número de ellos y la densidad de los mismos, los cuales inciden directamente en la capacidad de remoción de estos dispositivos.

En los últimos años surgieron estudios sobre el comportamiento del flujo multifásico en desarenadores de tipo placa impacto. Andueza (2006) ^[1], realizó un análisis completo de la influencia de las configuraciones de placas deflectoras principales y laterales, y su repercusión en el proceso de remoción de partículas usando un modelo de “One Way Coupling”. No obstante, dicho modelo se caracteriza por no tomar en consideración el efecto de las partículas sobre el fluido. Esta aproximación no siempre es válida debido a que en ocasiones las partículas pueden tener dimensiones y propiedades que les permitan interactuar con el flujo y generar cambios en él.

Por tal motivo, en este trabajo de investigación se propone eliminar esta limitante considerando la interacción entre las partículas y el fluido con el uso de modelo de acoplamiento completo (Fully Coupled) y así estudiar su incidencia en los resultados de remoción y caída de presión en los desarenadores. Para dicho estudio se usará como herramienta un software de dinámica de fluidos computacional y se tomarán una serie de combinaciones de número y tamaño de partículas de arena para evidenciar la influencia en la remoción de sedimentos y la caída de presión.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar la influencia de las partículas sólidas en el comportamiento del flujo multifásico crudo-arena en un dispositivo de control de sólidos de tipo placa impacto.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Especificar las condiciones de diseño y operación de un desarenador de tipo placa de impacto, junto a las propiedades del crudo y características físicas de las partículas sólidas.

2. Comprender los principios básicos de funcionamiento del software comercial de dinámica de fluidos computacional CFD aplicados a un dispositivo de control de sólidos de tipo placa impacto.

3. Estudiar el comportamiento de las partículas de arena de diferentes tamaños usando la aplicación de Acople Completo Fluido-Partícula que ofrece el software comercial de dinámica de fluidos computacional CFD.

4. Determinar la influencia de las variaciones del tamaño y número partículas sólidas de arena en el porcentaje de remoción de sedimentos, mediante el uso de la aplicación de Acople Completo Fluido-Partícula que ofrece el software comercial de dinámica de fluidos computacional CFD.

5. Comparar los resultados obtenidos con estudios anteriores de prototipos similares.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

Para el desarrollo de esta investigación se revisaron los siguientes trabajos:

En 2005 Gómez ^[2], presentó un trabajo de investigación orientado al Diseño Conceptual para prueba piloto de un separador de Arena en Cabezal de Pozo, mediante el uso de simulaciones en un software comercial CFD en la modalidad 2-D en la cual se determinaron tanto el campo de flujo dentro del separador como la trayectoria de partículas para distintas ubicaciones de la placa impacto. Con ello se determinó la posición adecuada de la placa interna para el proceso de remoción de sólidos tomando como referencia las condiciones de funcionamiento del pozo MUC-84. No obstante, esta investigación se ve enmarcada por muchas limitantes como la consideración de un fluido monofásico por lo que el alcance de los resultados y el uso de la información arrojada deben ser analizados con cuidado.

Para el 2006, Andueza ^[1], presenta un trabajo sobre el comportamiento de un flujo multifásico en equipos de control de sólidos a nivel de cabezal de los pozos que fluyen a COA Estación (NMEF-4), en el cual se planteó un estudio completo de la influencia de las configuraciones de placas deflectoras principales y laterales y su efecto en el proceso de remoción de partículas sólidas. Este estudio se basó en simulaciones realizadas en un software comercial por CFD (Computacional Fluid Dynamics) considerando la modalidad de “One Way Coupling”, en la que no se toman en cuenta ciertos factores de acción y reacción de las partículas sólidas en el

crudo. Esta investigación es la base fundamental de este trabajo y es el punto de comparación de los resultados que se obtendrán.

A comienzos del 2009, Rodríguez ^[3] propuso una investigación orientada al Estudio del comportamiento del flujo multifásico en un separador vertical de gas-líquido utilizando la técnica de dinámica de fluidos computacional (CFD). El comportamiento del flujo gas-líquido se realizó por medio de un modelado en “Fully Coupled”. Se estudiaron el porcentaje de remoción de partículas de líquido de diversos tamaños y los campos de presión y velocidad, obteniendo como resultado que la remoción aumentaba en función a ciertos tamaños de partículas.

Este trabajo plantea una concepción diferente debido a que el estudio se realizará a un fluido multifásico de crudo y arena con acoplamiento completo de las partículas, en el que se busca extender la aplicabilidad de las investigaciones precedentes orientándolo principalmente a la influencia de los tamaños y números de partículas en la remoción de sedimentos y generar un punto de comparación en términos de este tipo de dispositivos.

2.2 Fundamentos teóricos

2.2.1 Definición y características de los Hidrocarburos

Los hidrocarburos son una familia de compuestos químicos orgánicos que contienen solamente átomos de Hidrógeno y Carbono. Estos átomos pueden combinarse en un gran número de formas. Por conveniencia, los hidrocarburos están separados en “familias” o series homólogas, donde cada quien tiene un nombre. En condiciones normales de presión y temperatura, los hidrocarburos pueden existir en estado gaseoso, líquido o sólido, según el número y arreglo de los átomos de Carbono en las moléculas. Los hidrocarburos con hasta cuatro (4) átomos de Carbono son

gaseosos, mientras que aquellos con más de veinte (20) átomos son sólidos y aquellos que contienen un número intermedio entre estos límites, son líquidos.

Los petróleos son frecuentemente caracterizados por las cantidades relativas de cuatro series de componentes o tipos de hidrocarburos. Los miembros de cada serie son similares en estructura química y propiedades. Las cuatro series que se encuentran en el petróleo son:

- Series de Alcanos lineales o ramificados (Parafinas)

- Series de Cicloalcanos (Naftenos)

- Serie de los Aromáticos

- Serie de los Asfaltenos o Resinas (Componentes policíclicos complejos de alto peso molecular que contienen átomos de Nitrógeno; sulfuro)

2.2.2 Principales componentes sólidos e impurezas en el petróleo

El petróleo arrastra consigo desde los yacimientos una serie de componentes sólidos que afectan el transporte a nivel de cabezal de pozos. Muchos de estos componentes tienen su naturaleza orgánica aunque la mayoría poseen composición inorgánica. Entre los más importantes destacan:

- Asfaltenos:

Son compuestos de alto peso molecular condensados en estructuras de cadenas que contienen arreglos aromáticos; saturados y están interespaciados con componentes de Nitrógeno, sulfuro y Oxígeno. La estructura básica está compuesta

de anillos aromáticos. Los asfaltenos son insolubles en el petróleo pero se dispersan en coloides. Tienden a ser sólidos, secos, polvo negro y no son volátiles.

- Componentes de Azufre

Son el grupo mayoritario de componentes no hidrocarburos en el petróleo. Los componentes de azufre son pesados, por lo tanto, solo los crudos más pesados los contienen. Se presentan comúnmente en forma de sulfuro de hidrógeno ^[4]

- *Partículas de arena*

Los problemas ocasionados por la producción de arena son casi siempre perjudiciales para la productividad del pozo a corto y/o largo plazo. Si bien algunos pozos normalmente experimentan una producción de sólido dentro de límites “manejables”, estos pozos constituyen la excepción y no la regla. En la mayoría de los casos, tratar de manejar los efectos de una producción severa de arena, a lo largo de la vida del pozo, no representa una opción operativa económicamente atractiva o prudente. Dentro de los principales problemas ocasionados por la producción de arena está la erosión causada en los accesorios situados en la línea de producción y la acumulación de arena en los equipos situados a nivel de superficie^[5]

2.2.3 Sistemas de Producción

Entre los aspectos fundamentales que intervienen en la explotación comercial de hidrocarburos, destaca notablemente el sistema de producción; pudiendo definirlo como el sistema de transporte de hidrocarburos desde el yacimiento hasta la estación recolectora, incluyendo los procesos de separación de sus fases: petróleo, gas y agua y el tratamiento y preparación de estos fluidos para su posterior comercialización, disposición o reinyección en el subsuelo. Para la ubicación deseable de los centros de

recolección y almacenamiento debe considerarse principalmente: el volumen de los fluidos que se producen, las características de los pozos y las distancias que los separan y los programas de desarrollo.

Desde cada pozo, los fluidos producidos son transportados a través de las tuberías de flujo hacia los múltiples de producción en las estaciones de flujo, para luego ser bombeado a estaciones principales o patios de tanques. Las líneas de flujo están conectadas a sistemas de recolección denominados múltiples de producción a los cuales llegan hidrocarburos provenientes de cada uno de los pozos productores, antes de ser enviados al resto de los equipos de producción que conforman una estación de flujo.^[6]

2.2.4 Fundamentos básicos de separación

En el diseño de separadores es necesario tomar en cuenta los diferentes estados en que pueden encontrarse los fluidos y el efecto que sobre éstos puedan tener las diferentes fuerzas o principios físicos. Los principios fundamentalmente considerados para realizar la separación física de vapor, líquidos o sólidos son: el momentum o cantidad de movimiento, la fuerza de gravedad y la coalescencia. Toda separación puede emplear uno o más de estos principios, pero siempre las fases de los fluidos deben ser inmiscibles y de diferentes densidades para que ocurra la separación.

Sustancias con diferentes densidades tienen diferentes momentum. Si una corriente de dos fases se cambia bruscamente de dirección, el fuerte momentum o la gran velocidad adquirida por las fases, no permite que las partículas de la fase pesada se muevan tan rápidamente como las de la fase liviana, este fenómeno provoca la separación.^[7]

2.2.5 Separación de Sólidos

Es muy importante la separación del petróleo de los sedimentos que lo acompañan desde el yacimiento. Para realizar la separación de los sólidos se emplean diversos tipos de separadores (desarenadores), cuya capacidad para manejar ciertos volúmenes diarios de crudo a determinadas presiones y etapas de separación, varía de acuerdo a las especificaciones de manufactura y funcionamiento requeridos.

Los desarenadores son dispositivos hidráulicos cuyo objetivo principal es eliminar residuos sólidos provenientes del yacimiento en pro de evitar desgaste y erosión a lo largo de los componentes a los que precede. Entre los más comunes en la industria están los desarenadores de tipo vórtices que consiste, como lo indica su nombre, en la formación de un vórtice (remolino) inducido mecánicamente, que captura los sólidos en la tolva central de un tanque circular. Los sistemas de desarenador por vórtice incluyen dos diseños básicos: cámaras con fondo plano con abertura pequeña para recoger la arena y cámaras con un fondo inclinado y una abertura grande que lleva a la tolva. A medida que el vórtice dirige los sólidos hacia el centro, unas paletas rotativas aumentan la velocidad lo suficiente para levantar el material orgánico más liviano y de ese modo retornarlo al flujo que pasa a través de la cámara de arena.

También existen los separadores de tipo placa impacto que consiste en una cámara comúnmente vertical, la cual está dividida en tres zonas: Entrada, salida y zona de recolección de sólidos como se muestra en la figura 2.1. Posee una placa deflectora interna la cual tiene como función disminuir la cantidad de movimiento de los fluidos que entran en el dispositivo permitiendo así la exclusión de las partículas sólidas. Al momento del choque de las partículas con la placa estas toman una tendencia a depositarse en el fondo del dispositivo. Además de esta placa puede

contar en su haber con otras pequeñas placas deflectoras laterales en pro de crear flujo secundario que favorezca el efecto de remoción de sedimentos.

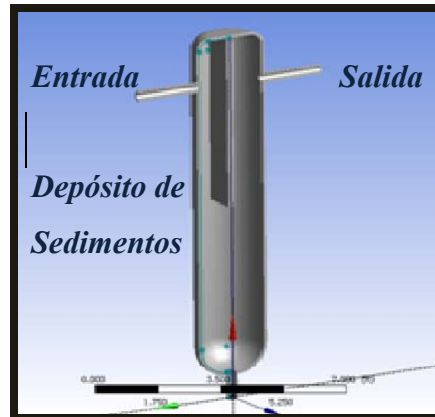


Figura 2.1 Vista en corte de un separador de tipo Placa Impacto

2.2.6. Ecuaciones de Navier Stokes

Las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos, conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes, surgieron producto del francés constructor de puentes Claude-Louis Navier y del matemático irlandés George Stokes.

A pesar de que las ecuaciones de Navier-Stokes son sólo una aproximación del comportamiento real de los fluidos, se utilizan para estudiar cualquier aspecto que tenga que ver con éstos; el problema es que si se estudia el movimiento de un fluido con estas ecuaciones, es incapaz de prever si ese movimiento se va a mantener siempre o se va a complicar. A continuación se presenta el sistema de ecuaciones conocido con el nombre de ecuaciones de Navier – Stokes. ^[8]

$$\begin{aligned}
\rho \frac{Du}{Dt} &= X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \text{div } \vec{v} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \\
\rho \frac{Dv}{Dt} &= Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \text{div } \vec{v} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\
\rho \frac{Dw}{Dt} &= Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \text{div } \vec{v} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right]
\end{aligned} \tag{2.1}$$

2.2.7 Interacción entre Fluidos y Partículas

Cuando una partícula sólida se mueve a través de un fluido experimenta una fuerza de arrastre que se opone a su movimiento. Esta fuerza de arrastre se origina por dos fenómenos llamados, el arrastre friccional en la superficie y el incremento en la presión que es generado en el frente de la partícula que se mueve a través del fluido.

El arrastre friccional es causado por la fuerza de corte del fluido cuando fluye sobre la superficie de la partícula. Esta componente es llamada arrastre viscoso. En la Fig. 2.2 se puede apreciar un esquema de una partícula cayendo en un fluido y las presiones comentadas anteriormente.

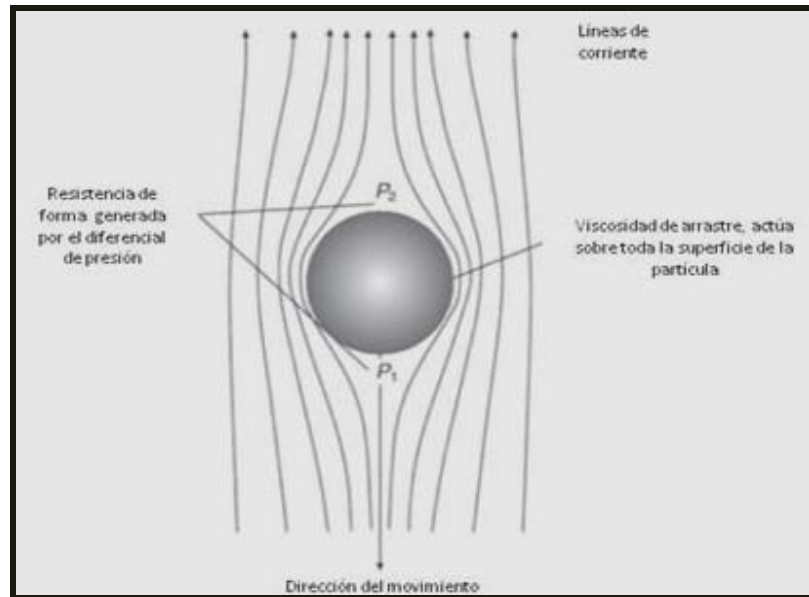


Figura 2.2 Líneas de flujo que se forman alrededor de una partícula que se mueve lentamente a través de un fluido en la dirección mostrada^[9]

Muchos experimentos han revelado que las partículas de diferentes tamaños muestran patrones de movimiento relativo al fluido que los rodea muy similares, pudiendo ser este aire, agua o cualquier otro fluido viscoso.

Tanto el arrastre de forma y el arrastre viscoso varían con la velocidad relativa entre la partícula y el fluido y con la densidad del fluido. Para el estudio de cómo se relacionan estas variables se tienen los siguientes números adimensionales:

$$C_D = \left(\frac{2F_D}{A_C \rho_f v^2} \right) \quad (2.2)$$

$$\text{Re}_p = \frac{d_p v \rho_f}{\mu_f} \quad (2.3)$$

Donde C_D es llamado el coeficiente de arrastre de la partícula y Re_p el número de Reynolds de la partícula. Estos son evaluados para cualquier velocidad relativa v ,

y para cualquier partícula de tamaño “ d_p ” F_p es la fuerza de arrastre sobre la partícula, A_c es el área de la partícula proyectada perpendicularmente al flujo de transporte, y ρ_c y μ_c la densidad y viscosidad del fluido de transporte. ^[9]

2.2.8 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

El caso de flujos complejos, como flujos turbulentos y flujos multifásicos (como el presente en los separadores de arena mencionados), constituye una de las tareas más difíciles para estudiar analíticamente. Es así como con el avance de las computadoras han surgido las herramientas computarizadas suficientes para la simulación numérica de este tipo de flujos.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta computacional que se utiliza para simular el comportamiento de los sistemas que implican flujo de fluidos, la transferencia térmica, y otros procesos físicos relacionados. Trabaja resolviendo las ecuaciones del flujo fluidos (en una forma especial) sobre una región de interés, con condiciones especificadas (conocidas) en los límites de esa región. ^[10]

2.2.9 Las matemáticas del CFD

El sistema de las ecuaciones que describen los procesos de cantidad de movimiento (momentum), calor y transferencia de masa son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones diferenciales fueron derivadas y no tienen ninguna solución analítica general conocida pero pueden ser descritas y solucionadas numéricamente. Las ecuaciones que describen otros procesos, tales como combustión, se pueden también solucionar conjuntamente con las ecuaciones de Navier-Stokes. A menudo, se utilizan modelos aproximados para derivar

ecuaciones. Existen diversos métodos de solución que se utilizan en códigos del CFD, tales como:

- Diferencias Finitas.
- Elementos Finitos.
- Elementos de Frontera.
- Métodos Espectrales.

2.2.10 Metodología de CFD

CFD puede ser usado para determinar el funcionamiento de un componente en la etapa de diseño, o puede ser usado para analizar dificultades con un componente existente y buscar mejoras en su diseño. Por ejemplo, si se busca estudiar la caída de presión, el primer paso es determinar la región de interés:

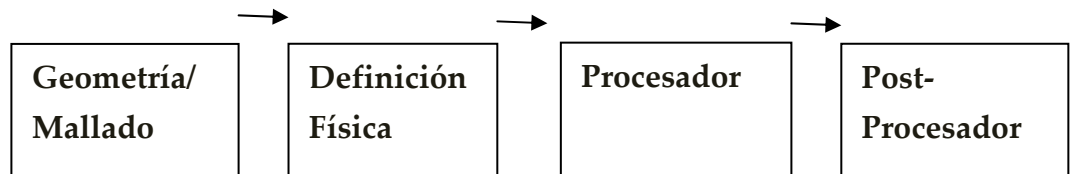
La geometría de la región de interés es definida. Si la geometría ya existe en formato CAD puede ser importado directamente. Luego se procede a la creación de una malla cuyo objetivo es discretizar las ecuaciones diferenciales del fenómeno para así obtener de ellas ecuaciones algebraicas cuyas incógnitas se ubican en los denominados nodos de la malla (intercepciones de las líneas que definen la malla). Después de la importación de la malla en el preprocesador, otros elementos de la simulación deben ser definidas, como lo son las condiciones de borde y las propiedades del fluido en estudio.

El sistema de ecuaciones se resuelve y se produce un archivo con los resultados que contienen la velocidad, presión y cualquier otra variable de interés en todas las zonas de la región.

Los resultados pueden ser visualizados y pueden proporcionar una comprensión del comportamiento del fluido en todas partes de dicha región.

Esto puede conducir a diseñar las modificaciones que pueden ser probadas cambiando la geometría del modelo de CFD y observando el efecto.

El Proceso en CFD se divide entonces en 4 etapas (Geometría/Mallado, definición física, procesador y Postprocesador) como se esquematiza a continuación



2.2.10.1 GEOMETRÍA/MALLADO

Este proceso interactivo es la primera etapa de proceso. El objetivo es producir una malla para la entrada al preprocesador. Antes de que una malla pueda ser producida, se requiere de una geometría sólida delimitada. La geometría y la malla pueden ser previamente realizadas e importadas de cualquier otro instrumento de creación de geometría/mallado. Los pasos básicos implican:

- 1 Definición de la geometría de la región de interés.
- 2 Creación de las regiones fluidas, regiones sólidas y nombres superficiales divisorios.

- 3 Ajuste de propiedades de la malla como espaciamentos, inflaciones y puntos de control.

Esta etapa del proceso previo ahora está sumamente automatizada. En muchos programas, la geometría puede ser importada de la mayoría de los principales paquetes de CAD que usan el formato original y luego la malla del volumen de control es generada automáticamente.

2.2.10.2 DEFINICIÓN FÍSICA

Este proceso interactivo es la segunda etapa de proceso previo y es usado para crear la entrada requerida por el solucionador. Los archivos del mallado son cargados en el preprocesador.

Los modelos físicos que deben ser incluidos en la simulación son seleccionados. Las propiedades de los fluidos y condiciones de borde son especificadas.

2.2.10.3 SOLUCIONADOR

Es el componente que resuelve el problema CFD. Este genera los resultados requeridos a través de un proceso iterativo. El problema CFD es solucionado de la siguiente manera:

Las ecuaciones diferenciales parciales son integradas sobre todos los volúmenes de control producidos por la malla en la región de interés. Esto es equivalente a la aplicación de una ley de conservación básica (como la masa o momentum) a cada volumen de control.

Estas ecuaciones integrales o diferenciales son convertidas a un sistema de ecuaciones algebraicas con el uso de un juego de aproximaciones a cada término en las ecuaciones.

Las ecuaciones algebraicas son solucionadas iterativamente.

Requieren de un proceso iterativo debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones. Se dice que la solución converge cuando esta se acerca a la solución exacta, se dice para converger. Para cada iteración, un error, o residual, es utilizado como una medida de la conservación total de las propiedades de flujo.

La cercanía entre la solución numérica y la solución exacta depende de un número de factores, incluyendo el tamaño y la forma de los volúmenes de control del mallado y el valor de los residuales finales.

Complejos procesos físicos, como la combustión y la turbulencia, a menudo son modelados usando relaciones empíricas. Las aproximaciones inherentes en estos modelos también contribuyen a diferencias entre la solución CFD y el verdadero flujo.

El proceso de solución no requiere ninguna interacción de usuario y por lo tanto, por lo general es realizado como un procesamiento por lotes. El solucionador produce un archivo de resultados que entonces es pasado al post procesador.

2.2.10.4 POSTPROCESADOR

Es el componente implementado para analizar, visualizar y presentar los resultados interactivamente. El postprocesamiento permite obtener valores en puntos complejos de las secuencias animadas.

Los ejemplos de algunos rasgos importantes del postprocesador son:

1. La visualización de la geometría y volúmenes de control del mallado.
2. Demostración de diagramas vectoriales que plasmen la dirección y la magnitud del flujo.
3. La visualización de la variación de variables escalares (las variables que tienen sólo la magnitud, no la dirección, como la temperatura, la presión y la velocidad) en el dominio.
4. Cálculos Cuantitativos numéricos. Gráficas que muestran el comportamiento de las variables.^[10]

2.2.11 Discretización de las ecuaciones que gobiernan los fenómenos fluidodinámicos por el método de Volúmenes Finitos (Discretización numérica)

Las soluciones analíticas para las ecuaciones de Navier-Stokes sólo existen para la más simple de las corrientes bajo condiciones ideales. Para obtener soluciones numéricas para los flujos reales, las ecuaciones se sustituyen por aproximaciones algebraicas que pueden ser resueltas usando un método numérico.

Este enfoque implica una discretización espacial del dominio en volúmenes de control finitos usando una malla. Las ecuaciones que gobiernan el fenómeno se integran en cada volumen de control, de manera que la cantidad de referencia (cantidad de movimiento, energía, etc) se conserva en un sentido discreto para cada volumen de control. La figura 2.3 muestra una malla en 2D con profundidad igual a la unidad en la que una superficie de un volumen finito es representada por el área sombreada.

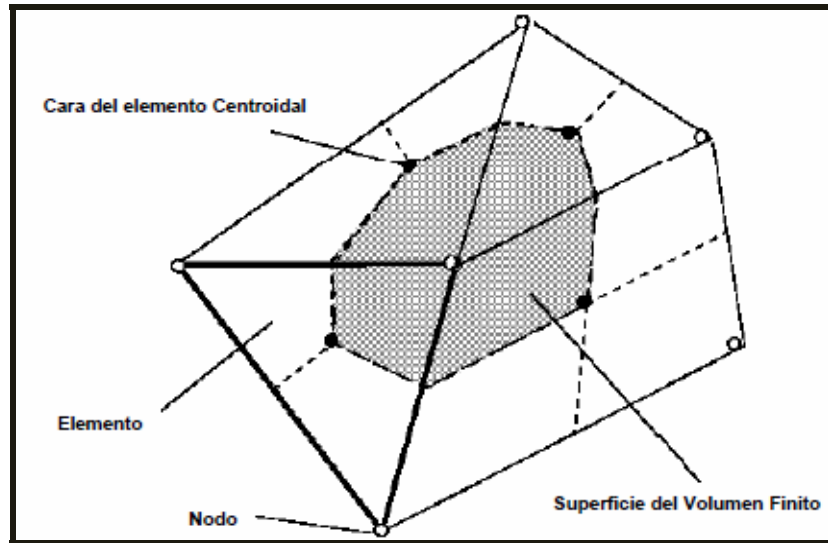


Figura 2.3. Superficie del volumen finito

Se observa que cada nodo está rodeado por un conjunto de superficies que componen el volumen finito. Todas las variables de solución y propiedades de los fluidos se almacenan en los nodos del elemento. Se debe tener en cuenta la forma media de las ecuaciones de conservación de la masa, el impulso y un pasivo escalar, expresado en coordenadas cartesianas^[11]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{off} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho \bar{g} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_{off} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \right] + S_\phi \quad (2.6)$$

Estas ecuaciones integran en cada uno de los volúmenes de control, y el teorema de la divergencia de Gauss es aplicado para convertir algunas integrales de

volumen a integrales de superficie. Para los volúmenes de control que se no se deforman con el tiempo, las derivadas de tiempo se pueden mover fuera de las integrales de volumen y el las ecuaciones se convierten en

$$\frac{d}{dt} \int_v \rho dV + \int_s \rho U_j dn_j = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{d}{dt} \int_v \rho U_i dV + \int_s \rho U_j U_i dn_j = - \int_s P dn_j + \int_s \mu_{off} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] dn_j + \int_v S_{u_i} dV \quad (2.8)$$

$$\frac{d}{dt} \int_v \rho \phi dV + \int_s \rho U_j \phi dn_j = \int_v \Gamma_{off} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_v S_\phi dV \quad (2.9)$$

Donde V y s, respectivamente, denotan el volumen y las regiones de la superficie de la integración. dn_i y dn_j son las componentes cartesianas diferencial del vector de la superficie exterior normal.

Las integrales de superficie son las integraciones de los flujos, mientras que las integrales de volumen representan la fuente o términos de acumulación.

El primer paso para resolver estas ecuaciones numéricamente es la aproximación de ellas utilizando funciones discretas aplicadas a los elementos de la malla como la que se muestra en la figura 2.4.

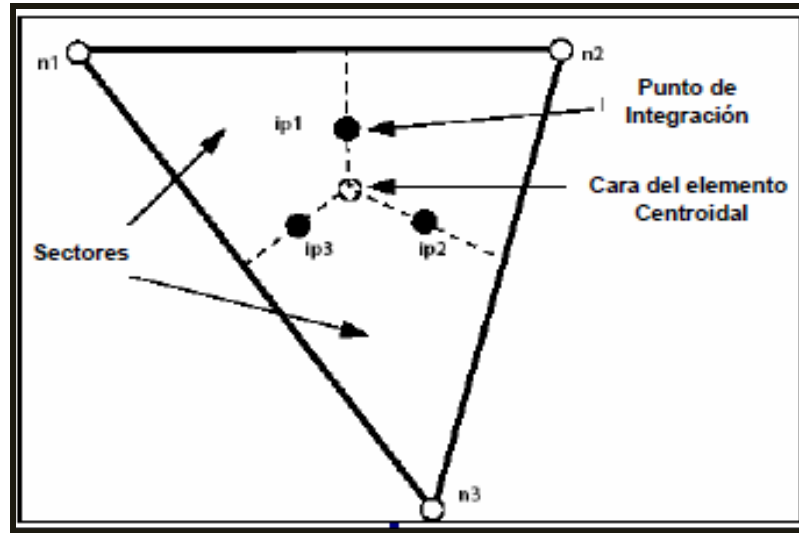


Figura 2.4 Elemento del malla

Al realizar el procedimiento antes mencionado se obtienen las siguientes ecuaciones en cada elemento:

$$V \left(\frac{\rho - \rho^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho U_j \Delta n_j)_{ip} = 0 \quad (2.9)$$

$$V \left(\frac{\rho U_i - \rho^o U_i^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left[\mu_{off} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right]_{ip} + \bar{S}_U V \quad (2.10)$$

$$V \left(\frac{\rho \phi - \rho^o \phi^o}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (\phi)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left[\Gamma_{off} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \Delta n_j \right]_{ip} + \bar{S}_\phi V \quad (2.11)$$

Donde ip es el punto de integración, Δn_j es la superficie exterior discreta del vector, Δt es el paso del tiempo. Se debe tener en cuenta que el superíndice “o” se refiere al tiempo anterior. El flujo de masa discreta a través de una superficie del volumen finito es denotado por \dot{m} y está dada por: ^[11]

$$\dot{m}_{ip} = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip} \quad (2.12)$$

Luego las derivadas que aún se encuentran en las ecuaciones anteriores son aproximadas de series de Taylor truncadas con lo que se obtienen las ecuaciones algebraicas finales.

2.2.12 Flujo Multifásico y Multicomponente en CFD

El flujo multifásico es un flujo en el cual hay más de un fluido presente. En general, los fluidos consisten en diferentes especies químicas como por ejemplo, aire y agua. En algunos casos, ellos pueden representar las diferentes fases termodinámicas de una misma especie, por ejemplo, el agua y el vapor de agua.

Es importante distinguir entre el flujo multicomponente y multifásico. Un fluido multicomponente consiste en una mezcla de especies química que son mezcladas a nivel molecular. En este caso, para la solución se mantiene una velocidad global del fluido, un mismo campo de temperatura, etc. Ejemplos comunes serían: mezclas gaseosas, y de líquidos solubles.

En flujos multifásicos, la interacción se da a nivel macroscópico, es decir, a una escala mucho mayor que la molecular. Los ejemplos son burbujas de gas en un líquido, gotas líquidas en un gas o en otro líquido inmiscible, sólidos en corrientes líquidas entre otros. En este caso, la solución se obtiene considerando velocidades independientes para cada una de las fases, así como también los campos de temperatura.

Estos pueden actuar recíprocamente el uno con el otro mediante fuerzas superficiales y afectarse por efectos de transferencia de calor y masa. Por ejemplo, si partículas frías y mojadas son inyectadas en una corriente libre a alta velocidad de aire caliente, las partículas serán aceleradas por el arrastre y serán calentadas por la transferencia térmica a través del límite de fase.

2.2.13 Modelado de Transporte de Partículas

Existen dos alternativas comunes de modelado de partículas. El primero es el modelo multifásico Euleriano-Euleriano y el segundo es el modelo multifásico Lagrangiano para trayectorias de partículas. Este último es el más recomendado para el estudio de flujos con partículas por su mayor precisión. Su única desventaja es que genera mayor carga computacional por cuanto se estudia partícula por partícula. Sin embargo la fase continua que carga a las partículas deben ser estudiadas en el modelo euleriano.

El modelo Lagrangiano o de transporte de partículas es capaz de modelar las fases dispersas que discretamente son distribuidas en una fase continua. El modelado implica el cálculo separado de cada fase con condiciones de fuente en las ecuaciones de conservación para tomar en cuenta los efectos sobre las partículas sobre la fase continua. Gotas de agua dispersas en el aire de los rocíos líquidos de una torre de enfriamiento y partículas sólidas dispersas en el aire del transporte neumático de alimentos sólidos, son ejemplos de estos casos.

El término “partícula” es usada para describir un elemento individual discreto de la fase dispersa. La partícula podría representar una gotita o una burbuja. En casos donde el flujo contiene pequeñas partículas, pueden haber millones de partículas por segundo siendo inyectadas. Para evitar el costo computacional de modelar cada partícula individualmente, se puede trabajar con una muestra representativa que tenga un número menor de partículas. El flujo másico de partículas puede ser especificado en una condición de borde de tipo entrada, apertura, pared e incluso en interfaces de dominios sólidos y líquidos. Esto permite al software estimar el número de trayectorias de partículas que debe modelar.

Todas las partículas representadas por una partícula de la muestra seguirán exactamente la misma trayectoria, incluso si se usa la dispersión de partícula turbulenta.

2.2.14 Flotabilidad

Según sea el tipo de flujo, las condiciones de la flotabilidad (gravedad) deben ser modeladas. La densidad del material de la partícula es a menudo mucho más alta que el del fluido portador, causando una fuerza de flotabilidad. Sin embargo, otras fuerzas pueden predominar causando que el efecto de la flotabilidad sea despreciable y no sea necesario considerarlo. Deben ser consideradas las influencias de tres (3) Fuerzas:

-La Fuerza de Arrastre

-La Fuerza de Inercia

-La Fuerza de Flotabilidad

A menudo la fuerza de flotabilidad puede ser despreciable si el arrastre y fuerzas de inercia son predominantes. En general, si se considera importante la colocación de las partículas, entonces el término de flotabilidad debería ser incluido.

Si el término de flotabilidad no es importante para la fase de partículas, todavía pudiera ser incluido si la convección debido a variaciones de densidad en la fase continua es importante. Esto es independiente al modelado de transporte de partícula. Para cálculos de flotabilidad, un término fuente es añadido a las ecuaciones de Momentum de la siguiente forma:

$$S_m = g(\rho - \rho_{ref}) \quad (2.13)$$

La diferencia de densidad ($\rho - \rho_{ref}$) es evaluada usando modelo de Flotabilidad Completa o el modelo de Boussinesq, dependiendo de la física.

Cuando la flotabilidad es activada, la presión en la ecuación de momentum excluye el gradiente hidrostático debido a ρ_{ref} .

2.2.15 Turbulencia y Modelos de Turbulencia

La turbulencia consiste en fluctuaciones en el campo de flujo en el tiempo y el espacio. Esto es un proceso complejo, principalmente porque es tridimensional, inestable y se presenta en amplia escala. Esto puede tener un efecto significativo sobre las características del flujo. La turbulencia ocurre cuando las fuerzas de inercia en el fluido se hacen significativas comparadas a fuerzas viscosas, y es caracterizado por un alto Número de Reynolds.^[12]

En principio, la ecuación de Navier-Stokes describe tanto flujos laminares como turbulentos sin la necesidad de la información adicional. Sin embargo, en flujos turbulentos con números de Reynolds realistas, abarcan grandes rangos de longitudes turbulentas y escalas de tiempo y generalmente implicarían el uso de escalas de longitud mucho más pequeñas que la malla de volúmenes finitos menor que puede ser usada en un análisis numérico. La Simulación Numérica Directa (DNS) de estos flujos requeriría el poder de procesamiento que es muchos órdenes de magnitud más alto que el disponible en el futuro previsible.

Por otro lado, existe el método de simulación de grandes torbellinos (LES) que es de un costo computacional inferior al DNS, pero el esfuerzo y los recursos computacionales para su uso siguen siendo demasiado grandes para aplicaciones

industriales. Con la simulación de grandes torbellinos se resuelven espacialmente las Ecuaciones de Navier-Stokes donde, los grandes torbellinos son resueltos de manera directa pero los de un tamaño menor que el tamaño del mallado han de ser modelados matemáticamente.

Una tercera forma de estudiar los flujos turbulentos es con el promedio de Reynolds de la ecuación de Navier-Stokes. Es el modelo más popular a nivel de industria. La solución de la ecuación de Navier Stokes en el tiempo, puede modelarse a todas las escalas de longitud turbulenta con una amplia variedad de modelos matemáticos desarrollados. Esta versión de la ecuación de Navier-Stokes requiere de unos modelos de turbulencia que han sido desarrollados para representar los efectos de turbulencia para evitar recurrir a una prohibitiva malla fina y Simulación Numérica Directa. La mayor parte de modelos de turbulencia son basados en modelos de tipo estadístico.^[12]

Entre los modelos de turbulencia de este método encontramos:

Modelo de viscosidad de torbellino (EVM)

-Zero Equation model.

-Standard k- ϵ model.

-RNG k- ϵ model.

-Standard k- ω model.

-Baseline (BSL) zonal k- ω based model.

-SST zonal $k-\omega$ based model.

-($k-\epsilon$) 1E model.

Modelo de esfuerzo de Reynolds (RSM)

-LRR Reynolds Stress

-QI Reynolds Stress

-Speziale, Sarkar and Gatski Reynolds Stress

-SMC- ω model

-Baseline (BSL) Reynolds' Stress modelo

2.2.16 Modelo de Turbulencia $k-\epsilon$

Uno de los modelos de turbulencia más prominentes, el modelo $k-\epsilon$, ha sido puesto en práctica en la mayor parte de los códigos de CFD en términos generales y es considerado el modelo de estándar de industria. Este ha resultado ser estable y numéricamente robusto y tiene un régimen bien establecido de capacidad de predicción. Para simulaciones de objetivo generales, el modelo $k-\epsilon$ ofrece una buena relación entre exactitud y robustez.

El software comercial a utilizar ajusta el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ usando el acercamiento de función de la pared que mejora la robustez y la exactitud cuando la malla cercana de la pared es muy fina. Las funciones de pared permiten una solución

arbitraria en rejillas muy cercanas a la pared que es una significativa mejora en las funciones estándares de pared.

2.2.17 Opciones de acoplamiento de Partículas

Las partículas pueden ser completamente acopladas con el fluido (Fully Coupled) o pueden ser acopladas en una sola vía o unidireccionalmente (One Way Coupling). En Acople completo (Fully Coupled) existe una interacción de las partículas con la fase continua y viceversa, permitiéndole al flujo continuo afectar el movimiento de las partículas y estas a su vez al flujo que las porta. Con acoplamiento completo se puede predecir el efecto de las partículas en el flujo de fase continua, pero tiene un costo computacional muy alto. Un acoplamiento de forma simple (One Way Coupling) predice las trayectorias de las partículas como un post-proceso basado en el campo de flujo y por lo tanto no influye en la fase continua.

La elección de acoplamiento completo de las partículas depende de la carga en masa, es decir, tanto el flujo de masa de partículas y la velocidad de flujo de masa de fluido. Un acoplamiento simple (One Way Coupling) puede ser una aproximación aceptable con bajo flujo másico de las partículas considerando que estas tienen una influencia insignificante sobre el flujo. Si las partículas influyen en el flujo de líquido de manera significativa, entonces se debe usar el acoplamiento completo.

Las partículas pueden ser completamente acopladas al fluido (Fully Coupled”) o pueden ser acopladas en una sola vía o unidireccionalmente (One Way Coupled). En las partículas acopladas completamente, éstas intercambian la cantidad de movimiento con la fase continua, permitiendo de esta manera que el flujo afecte a las partículas y que éstas a su vez afecten al flujo.

2.2.18 Número de Stokes

Un parámetro clave en el fluido de las corrientes de partículas es el número de Stokes (St), que es la relación entre el tiempo de respuesta de una partícula a un tiempo característico del flujo en un sistema. El tiempo de respuesta de las partículas es el tiempo que una partícula que se necesita para responder a un cambio en la velocidad del fluido portador.

Desde el punto de vista matemático se puede definir como:

$$St = \frac{\tau_p}{T_k} \quad (2.14)$$

Donde τ_p es el tiempo de respuesta de la partícula y T_k es un tiempo característico del campo de flujo. Para el caso de un Venturi sería y:

$$St = \frac{\tau_p * U}{D_t} \quad (2.15)$$

Donde D_t es el diámetro de la garganta y U la velocidad del fluido

Teóricamente, se considera $St=1$ como un valor referencial ($\tau_p=T_k$). En base a esto se dice que cuando $St \ll 1$, las partículas responden de manera inmediata a los cambios en el fluido que los porta y se dejan arrastrar por el mismo y cuando el $St \gg 1$, sucede que las partículas tardan en responder a los cambios en el flujo, por lo que no se ven afectadas por el mismo. En base a estos 2 fenómenos se pueden manejar los conceptos de St críticos inferior y superior. Se habla de un St_{crit} inferior en el punto en el cual la trayectoria de las partículas deja de depender solamente del predominio del flujo y empiezan a interactuar por causas de la inercia y la gravedad.

Por otro lado, en el punto en el cual el efecto del flujo se hace despreciable y el movimiento de las partículas se debe solo al efecto de la gravedad se habla de un $St_{\text{crítico}}$ superior.

Una de las variables que afecta el valor del St conoce como “carga”. La carga se puede definir como la relación entre el flujo másico de las partículas y el flujo de masa de líquido (fracción volumétrica de partículas “ φ ”). Muchas aplicaciones industriales implican flujos de partículas altamente cargadas. Si la carga de partículas es pequeña, el líquido afectará la dinámica de las partículas, pero las partículas no influyen en la dinámica del fluido y por otra parte, si la carga es muy grande, habrá mayor interacción entre las partículas y su fluido portador.

Además del número de partículas, otro aspecto que afecta al St es la masa individual las mismas. Mientras mayor es la masa de la partícula, más acentuada será la resistencia que esta presentará al movimiento del fluido y se verá más afectada por la fuerza de la gravedad.^[13]

2.2.19 Número adimensional de Velocidad de Sedimentación

El Sv permite contrastar la importancia de la velocidad de la partícula desarrollada por efectos gravitatorios con respecto a la velocidad adquirida por efectos fluidodinámicos. Cuando es muy grande implica que la partícula es influenciada mayormente por la gravedad, esto trae como consecuencia que la partícula tienda a caer rápidamente en línea recta sin tener tiempo de interactuar con el fluido en movimiento. Por el contrario si es muy pequeño, la partícula interactúa completamente con el fluido sin mayor efecto de sedimentación.

Este número adimensional se define por la siguiente expresión:

$$Sv = \frac{V_{sed}}{U_{xo}} \quad (2.16)$$

Donde V_{sed} es la velocidad de sedimentación de la partícula cayendo en un flujo estático por acción de la gravedad y U_{xo} es la velocidad del fluido que la partícula percibe.^[14]

CAPITULO III

MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

3.1 Descripción física del modelo

El dispositivo es un desarenador de tipo placa impacto el cual es un recipiente cilíndrico cuya configuración interna está comprendida por una placa deflectora, la cual tiene como función principal, reducir la cantidad de movimiento que trae el flujo que entra al dispositivo, permitiendo así la separación de las partículas de arena. En la figura 3.1 se muestra el volumen de control desde diversas vistas.

Para la elaboración del modelo físico se tomaron en consideración las características de un modelo real, ubicado en la Estación de Flujo Amana (NMEF-4) ubicado en Punta de Mata, Estado Monagas. Las dimensiones utilizadas fueron obtenidas del trabajo de investigación realizado por Andueza^[1] a partir de la ficha técnica elaborada por la empresa fabricante **TETRA Production Services, L.P.**

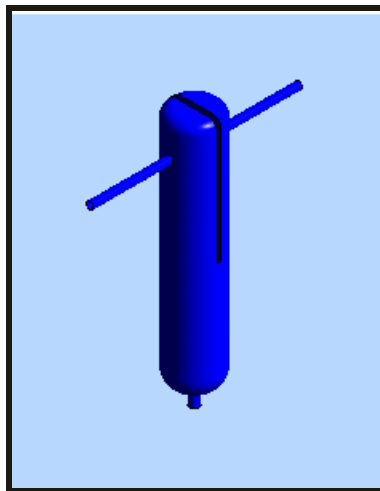


Figura 3.1 Vista de la geometría final (volumen de control)

La geometría (Figura 3.2) muestra al desarenador de tipo placa impacto con una altura de 3,4747m (11,4 pies) y un diámetro de 0,67056m (2,2 pies) con una placa deflectora de 1,6459m (5,4pie) ubicada a 0,3048m (1 pie) de la entrada. Las tuberías de entrada y salida de la mezcla crudo-arena poseen diámetros de 0,1016m (0,3333 pie)

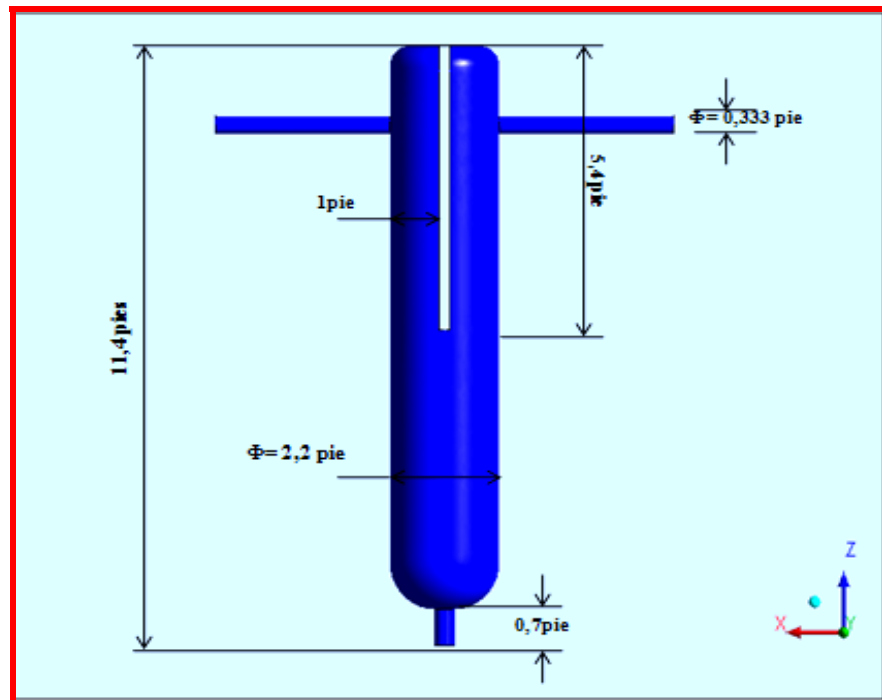


Figura 3.2 Dimensiones del desarenador

3.2 Especificación de las propiedades de las fases

Las propiedades que posean las fases en estudio son de vital importancia en las previas de la simulación. En esta investigación se tomaron en consideración dos fases predominantes, una líquida continua (Crudo) y una fase sólida dispersa (Partículas de arena). Todas las propiedades fueron tomadas en función a lo establecido en el trabajo de investigación realizado por Andueza^[1] en el 2006.

La fase continua líquida es una mezcla de hidrocarburos donde coexisten el petróleo, gas asociado y agua, sin embargo, se delimitó como una sola fase homogénea isotrópica para simplificar el estudio.

La selección del tamaño de partículas de arena se basó en la data que manejaba el pozo. Los distintos tamaños de las partículas fueron arbitrarios y uniformemente distribuidos en base al rango obtenido desde el pozo.

3.3 Descripción del modelo matemático aplicado por el software

El modelado del comportamiento de los sistemas fluidodinámicos en general, se rige bajo tres ecuaciones fundamentales de conservación, como lo son las de continuidad, momentum y energía. Sin embargo, el sistema en estudio puede ser simplificado por darse en un entorno tridimensional, manejando un flujo incompresible como fase continua, que posee propiedades constantes. Además se toma como consideración fundamental un estado estacionario (lo que permite que se eliminen términos transitorios) y que el flujo es isotérmico. En base a esto, las ecuaciones adaptadas al sistema en estudio se plasman de la siguiente manera:

-Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3.1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido y U su velocidad

-Ecuación de Conservación Momento

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B + S_M \quad (3.2)$$

Donde B es la suma de fuerzas de cuerpo, μ_{eff} es la viscosidad efectiva para la turbulencia, S_M es el término que involucra el acople de las partículas al fluido y la presión es modificada dada por:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (3.3)$$

La viscosidad efectiva μ_{eff} para la turbulencia se obtiene de la expresión:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.4)$$

Donde μ_t es la viscosidad de turbulencia. El modelo k- ϵ de turbulencia asume que la viscosidad de turbulencia está vinculada la energía cinética turbulenta y la disipación por la relación:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.5)$$

Donde C_μ es una constante. La k es la energía cinética turbulenta y es definida como la varianza de las fluctuaciones en la velocidad. Esto tiene las dimensiones comúnmente en m^2/s^2 ϵ es la disipación de remolino de turbulencia (la tasa en la cual las fluctuaciones de la velocidad se disipan), así como las dimensiones de k por unidad de tiempo (L^2/t^3) (m^2/s^3).

Los valores de k y ε vienen directamente de las ecuaciones diferenciales de transporte para la energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación de turbulencia ε

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} \rho k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3.7)$$

Donde $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k y σ_ε son constantes.

P_k es la producción de turbulencia debido a fuerzas de flotabilidad y viscosas, que son modeladas usando:

$$P_k = \mu_t \nabla U \bullet (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3 \mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \quad (3.8)$$

Para el flujo de incompresible, $\nabla \cdot U$ es pequeño y el segundo término sobre el lado derecho de la ecuación anterior no contribuye considerablemente a la producción. Para el flujo compresible, es sólo grande en regiones con la alta divergencia de la velocidad, como en choques.

3.3.1 Modelo Matemático para Flujo Cercano a la Pared

La aproximación de la función de pared utilizado es una extensión del método de Launder y Spalding. En la región de la ley logarítmica, la velocidad tangencial cercana a la pared es relacionada al esfuerzo cortante en la pared, τ_w , mediante una relación logarítmica.

En la aproximación de la función de pared, la región de la sub-capa afectada por la viscosidad es resuelta por el empleo de formulaciones empíricas para proporcionar condiciones de frontera cercanas a la pared para las ecuaciones de flujo promedio y transporte turbulento.

Estas formulaciones conectan a las condiciones de pared con las variables dependientes en el nodo de la malla cercano a la pared, el cual se supone está localizado en la región completamente turbulenta de la capa límite.

La relación logarítmica para la velocidad cercana a la pared está dada por:

$$u^+ = \frac{U_t}{U_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C \quad (3.9)$$

Donde:

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u_\tau}{\mu} \quad (3.10)$$

$$u_\tau = \left(\frac{\tau_\omega}{\rho} \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

u^+ es la velocidad cercana a la pared, u_τ es la velocidad de fricción, U_t es conocida como la velocidad tangente a la pared a una distancia Δy desde la pared, y^+ es la distancia adimensional desde la pared, τ_ω es el esfuerzo cortante en la pared, κ es la constante de Von Karman y C es la constante de la capa logarítmica dependiente de la rugosidad de la pared.

La ecuación 3.10 tiene el problema de volverse singular en puntos de separación donde la velocidad cercana a la pared, U_t , se aproxima a cero. En la región

logarítmica, una escala de velocidad alternativa, u^* , puede ser utilizada en lugar de u^+ :

$$u^* = C_{\mu}^{1/4} k^{1/2} \quad (3.12)$$

Esta escala tiene la útil propiedad de que no tiende a cero si U_t tiende a cero (En flujo turbulento k nunca tiende a ser completamente cero). Basado en esta definición, se puede obtener la siguiente ecuación explícita de u_{τ} :

$$u_{\tau} = \frac{U_t}{\frac{1}{k} \log(y^*) + C} \quad (3.13)$$

El valor absoluto del esfuerzo cortante en la pared es obtenido entonces de la expresión siguiente:

$$\tau_{\omega} = \rho u^* u_{\tau} \quad (3.14)$$

Donde:

$$y^* = \frac{\rho u^* \Delta y}{\mu} \quad (3.15)$$

y u^* se resuelve de la ecuación 3.12.

3.3.2 Esquema de Advección

Para la discretización completa del término de advección, la variable ϕ_{ip} se debe relacionar con los valores nodales de ϕ . Los esquemas de advección implementados por el software comercial son de la forma:

$$\phi_{ip} = \phi_{up} + \beta \nabla \phi \cdot \Delta \bar{\gamma} \quad (3.16)$$

Donde ϕ_{up} es el valor en el nodo del aguas arriba, y $\bar{\gamma}$ es el valor desde el nodo aguas arriba al ip . Al usar una combinación específica, $\nabla \phi$ es el promedio de los gradientes nodales adyacentes y cuando se usa un esquema de alta resolución $\nabla \phi$ es el gradiente nodal del nodo aguas arriba. La opción particular de β es la que da lugar a los diferentes esquemas.

El esquema de advección a emplear en este trabajo será el *Esquema en Diferencia Aguas Arriba de Primer Orden (UDS)*, para el cual el término β es igual a cero. Muchos esquemas diferentes desarrollados por el software se basan en aproximaciones en series de expansión (tales como la serie de Taylor) para funciones continuas. Mientras más términos de expansión son usados en el esquema diferencial, más exacta será la aproximación (pero a costa de una carga computacional mayor).

El UDS es bastante robusto (numéricamente estable) y se ha probado que no introduce sobrestimaciones y subestimaciones no físicas.

3.3.3 Modelado matemático de transporte de partículas

Dentro del modelo de transporte de partículas, el flujo total de la fase de las partículas se modela por el seguimiento de un número pequeño de partículas, a través del fluido de la fase continua. Para este estudio, las partículas son sólidas y el modelo multifásico utilizado para seguir su comportamiento es el “Lagrangiano”. Este modelo dentro del software implica la integración de la trayectoria de las partículas a través del dominio discretizado. Las partículas individuales se siguen desde su punto de inyección hasta que escapan del dominio. Cada partícula se inyecta, alternadamente, para obtener un promedio de todas las trayectorias de las partículas y para generar términos fuente de las ecuaciones fluidas de masa y cantidad de movimiento. Debido a que cada partícula es seguida desde su punto de inyección hasta su destino final, el procedimiento es aplicable a análisis de flujo en estado estable.

Las partículas se calculan usando el esquema de integración hacia delante de Euler de la velocidad de la partícula a través del paso del tiempo, δt .

$$x_i^n = x_i^o + v_{pi}^o \delta \cdot t \quad (3.17)$$

Donde los índices “o” y “n” se refieren a viejos y nuevos valores respectivamente y V_{pi} es la velocidad de la partícula. En la integración hacia adelante, la velocidad de la partícula es calculada al iniciarse el paso del tiempo. Al finalizar el paso del tiempo, la nueva velocidad de la partícula es calculada usando la solución analítica.

$$v_p = v_f + (v_p^o - v_f) \exp\left(-\frac{\delta t}{\tau}\right) + \tau F_{all} \left(1 - \exp\left(-\frac{\delta t}{\tau}\right)\right) \quad (3.18)$$

Las propiedades del fluido se toman a partir del inicio del paso del tiempo. Para la cantidad de movimiento de la partícula, Φ^0 correspondería a la velocidad de la partícula al inicio del paso del tiempo.

En el cálculo de todas las fuerzas muchas variables fluidas, tales como densidad, viscosidad y velocidad son necesarias en la posición de la partícula. Estas variables se obtienen siempre con suficiente precisión calculando el elemento en el que la partícula está viajando, calculando la posición computacional dentro del elemento y usando las funciones de forma del algoritmo de discretización para interpolar la posición de las partículas.

Según la ecuación 3.21 el fluido afecta el movimiento de la partícula con el arrastre viscoso y una diferencia entre la velocidad de la partícula y el fluido. Inversamente si el fluido influencia las trayectorias de las partículas, pero estas no afectan el fluido, entonces la interacción se llama “Acoplado Unidireccional” (One Way Coupling). La predicción del flujo de dos fases en este tipo de acoplamiento es relativamente directa. El campo de flujo del fluido puede ser calculado independientemente de la trayectoria de las partículas. Este acoplamiento es una aproximación aceptable en flujos con una baja carga de la fase dispersa, donde las partículas tienen poca influencia sobre el flujo que los porta.

3.3.4 Transferencia de Cantidad de Movimiento

Considerando una partícula discretizada que viaje en un medio fluido continuo. Las fuerzas que actúan en la partícula que afectan su aceleración son debidas a la diferencia en velocidad entre la partícula y el fluido y debido al desplazamiento del fluido por la partícula.

La ecuación de movimiento para la partícula fue derivada por Basset, Boussinesq y Oseen para un marco de referencia en rotación:

$$\begin{aligned}
 m_p \frac{dv_p}{dt} = & \underbrace{\frac{1}{8} \pi \rho_f d^2 C_D |v_f - v_p| (v_f - v_p)}_I + \underbrace{\frac{\pi d^3 \rho_f}{6} \frac{dv_f}{dt}}_{II} + \underbrace{\frac{\pi d^3 \rho_f}{12} \left(\frac{dv_f}{dt} - \frac{dv_p}{dt} \right)}_{III} \\
 & + \underbrace{\frac{F_b}{IV} + \frac{3}{2} d^2 \sqrt{\pi \rho_f \mu} \int_{t_0}^{t'} \left(\frac{dv_f}{dt'} - \frac{dv_p}{dt'} \right) (t - t')^{-0.5} dt'}_V \\
 & - \underbrace{\frac{\pi d^3}{6} (\rho_p - \rho_f) \omega \times (\omega \times \bar{R})}_{VI} - \underbrace{\frac{\pi d^3 \rho_p}{3} \omega \times v_p}_{VII} + \frac{F_U}{VIII}
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Donde, m_p es la masa de la partícula, d es el diámetro de la partícula, v es la velocidad, ρ es la densidad, μ es la viscosidad dinámica del fluido, C_D es el coeficiente de arrastre, F_b es la fuerza de flotabilidad debido a la gravedad, ω es la velocidad rotacional y \bar{R} es un vector dirigido desde el eje de rotación, y F_U es cualquier fuerza definida. t_0 se utiliza para denotar el tiempo de salida, el subíndice f se refiere al fluido y el subíndice p se refiere a la partícula.

-El término en el lado izquierdo es una adición de todas las fuerzas que actúan en la partícula expresadas en los términos de la aceleración de la partícula.

-El término I es la fuerza de arrastre que actúa en la partícula.

-El término II es la fuerza aplicada en la partícula debido al gradiente de la presión en el fluido rodeando la partícula, causada por la aceleración del fluido. Es solamente significativa cuando la densidad del fluido es comparable o mayor que la densidad de la partícula.

-El término III es la fuerza de aceleración virtual de la masa del fluido en volumen ocupado por la partícula. Este término es importante cuando la masa del fluido desplazado excede la masa de la partícula.

-El término IV es la fuerza de flotabilidad debido a la gravedad, que para una partícula esférica viene dada por:

$$F_b = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_p - \rho_f) g \quad (3.20)$$

Donde, g es la gravedad.

El término V es la fuerza de Basset que cuenta para la desviación en el patrón de flujo en estado estable. Este término no se modela en el software, pero usualmente es despreciado.

-El término VI es la fuerza centrípeta y el término VII son las fuerzas de Coriolis, ambos términos solo se presentan en marcos de referencia rotatorios.

-El término VIII cualquier fuerza definida adicional.

De esta forma, la ecuación del movimiento tiene términos de aceleración de la partícula en ambos lados de la ecuación y requiere una solución mediante un método iterativo. La ecuación 3.19 se cambia para poner todas las aceleraciones de la partícula en el lado izquierdo. Se separa el término de masa virtual (término III) en sus dos componentes con el término de aceleración del fluido, que es combinado con el término de gradiente de presión.

En flujos donde la densidad de la partícula es mucho mayor que la densidad del fluido, la ecuación 3.19 se reduce a:

$$\frac{\pi d^3 \rho_p}{6} \frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{8} \pi \rho_f d^2 C_D |v_f - v_p| (v_f - v_p) + F_b - \frac{\pi d^3}{6} (\rho_p - \rho_f) \omega \times (\omega \times \bar{R}) - \frac{\pi d^3 \rho_p}{3} \omega \times v_p \quad (3.21)$$

Donde la inercia de la partícula se relaciona con la diferencia instantánea en velocidad entre la partícula y el fluido, y las fuerzas rotatorias y externas. La ecuación 3.21 representa el modelo de transporte de la partícula puesto en ejecución.

El término C_D de la ecuación se calcula a través del modelo de arrastre de partícula de Schiller-Neuman.

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad (3.22)$$

El software modifica esto para asegurar la correcta limitación de comportamiento del régimen de arrastre tomado.

$$C_D = \max \left(\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), 0.44 \right) \quad (3.23)$$

3.3.5 Turbulencia en el seguimiento de partículas

El cálculo del término de velocidad instantánea del fluido, V_f en la ecuación 3.21 depende del régimen del flujo y el tipo de partícula (promedio o con dispersión

turbulenta). En los flujos laminares o en los flujos donde el seguimiento promedio de la partícula es calculado, V_f es igual a la velocidad media del fluido $\overline{V_f}$, rodeando la partícula. La trayectoria de una partícula es única para una partícula inyectada en una localización dada en el flujo.

En el seguimiento turbulento, la velocidad instantánea del fluido se descompone en componentes promedios $\overline{V_f}$ y fluctuantes V'_f . Ahora dos partículas idénticas inyectadas en un solo punto a diferentes tiempos pueden tener trayectorias separadas debido a la naturaleza aleatoria de la velocidad instantánea del fluido, ya que esta componente fluctuante de la velocidad del fluido causa la dispersión de partículas en un flujo turbulento.

El modelo de dispersión turbulenta de partículas, asume que una partícula está siempre dentro de un solo remolino turbulento. Cada remolino tiene una velocidad fluctuante característica V'_f , tiempo de desenvolvimiento τ_e y longitud l_e . Cuando una partícula entra al remolino, la velocidad fluctuante de ese remolino se agrega a la velocidad promedio local del fluido, para obtener la velocidad instantánea usada anteriormente. La velocidad turbulenta del fluido, es asumida para prevalecer mientras el tiempo de la interacción de partícula-fluido es menor que el tiempo de desenvolvimiento del remolino y el desplazamiento de la partícula relativo al remolino es menor que la longitud del remolino. Si cualquiera de estas condiciones es excedida, la partícula se asume entrando a un nuevo remolino con nuevas características.

La velocidad de remolino, la longitud y el tiempo de desenvolvimiento turbulentos, se calculan con base a las propiedades locales de turbulencia del flujo:

$$v'_f = \Gamma(2k/3)^{0.5} \quad (3.24)$$

$$l_e = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (3.25)$$

$$\tau_e = l_e / (2k/3)^{1/2} \quad (3.26)$$

Donde, K y ε son la energía cinética turbulenta local y la disipación respectivamente y C_μ es una constante de la turbulencia. El factor $C_\mu^{3/4}$ fue elegido para relacionar la escala característica de la longitud y la longitud de disipación de remolinos. La variable Γ es el número de la distribución normal al azar, el cual considera la aleatoriedad de la turbulencia sobre un valor medio. Debido a esta aleatoriedad, cada componente de la velocidad fluctuante (u' , v' y w') puede tener un valor en cada remolino.

3.3.6 Criterio de convergencia (Residuales)

El software comercial de fluidodinámica computacional, calcula residuos normalizados para calificar la convergencia de los problemas simulados. El solucionador emplea el residuo normalizado para detener una ejecución cuando se ha alcanzado un nivel de residual específico. La tasa de convergencia por la ecuación (3.18) en la cual R_n es el residual de la iteración y R_{n-1} es el residual de la iteración anterior.

$$Rate = \frac{R_n}{R_{n-1}} \quad (3.27)$$

El software permite seleccionar el criterio para detener la ejecución entre dos normas disponibles para el cálculo de los residuos.

La norma “Raíz del Promedio de los Cuadrados” (Root Mean Square, *RMS* por sus siglas en inglés), la cual eleva al cuadrado el residual normalizado en cada volumen de control del dominio, luego suma esos cuadrados, los promedia y finalmente saca la raíz cuadrada a este valor:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r)^2} \quad (3.28)$$

Donde n es el número de volúmenes de control en el dominio y r es el residual cada uno de esos volúmenes.

La segunda norma conocida como *MAX* establece que el valor del residual es igual al valor absoluto del máximo residuo en todo el dominio:

$$MAX = \max |r| \quad (3.29)$$

En este trabajo se considera como criterio de convergencia la norma *RMS* con un nivel de convergencia o límite de residual de 1×10^{-4} , el cual es considerado como un nivel bueno y recomendado por el software.

CAPITULO IV

DESARROLLO DEL MODELO

4.1 Descripción del modelo utilizado

Inicialmente es importante delimitar las condiciones en la cual se hará el estudio, las propiedades, y las metodologías computacionales que permitan describir el fenómeno de la manera más apropiada. Para esto se definen 2 pasos primordiales:

-Crear del dominio de cálculo

-Definir las condiciones de borde.

4.1.1 Dominio de Cálculo

En esta etapa se delimita el dominio a estudiar. Se definen además las características de las fases y algunos modelos fluidodinámicos que van a permitir el modelado del proceso. Primero deben crearse las fases ya que en este caso son especificadas por el usuario. Las características y propiedades fueron obtenidas de la data que presentó Andueza^[1] en su trabajo de investigación. A continuación se muestran:

Para el “Crudo” que es la fase continua:

-Masa molar: 127,77 Kg/Kmol

-Densidad: 762,897 Kg/m³

-Viscosidad Dinámica: 0,0011684 Kg/m.s

Para la “Arena” que es la fase dispersa:

-Masa molar: 60 g/mol

-Densidad: 2500 Kg/m³

Para trabajar la fase dispersa, se activa la opción de “Particle Tracking” por medio del cual se activa la opción para utilizar el modelo Lagrangiano. Aquí se debe considerar el efecto de la gravedad por lo tanto se debe trabajar considerando el “Bouyancy” o Flotabilidad dándole el valor a la gravedad en el sentido correspondiente. La presión de referencia se establece en 1 Atm. Además para efecto de la flotabilidad, se debe dar una densidad de referencia. En estos casos el software recomienda tomar el valor de densidad más bajo entre las sustancias que se utilizan. Para este estudio se utiliza 762,897 Kg/m³ la cual es la densidad del crudo.

El acoplamiento se hará según sea el caso en “Fully Coupled” o “One Way Coupling”. El modelo de turbulencia es el k-ε y el efecto de fuerza de arrastre se realiza en base al modelo de Schiller-Naumann.

4.1.2 Condiciones de Frontera

En este estudio se manejarán 3 tipos de condiciones de frontera que fueron: Entrada, Salida y Pared. En la figura 4.1 se indica la ubicación de las regiones donde se especifican las condiciones de frontera. A continuación se describen las características de cada una de las fronteras.

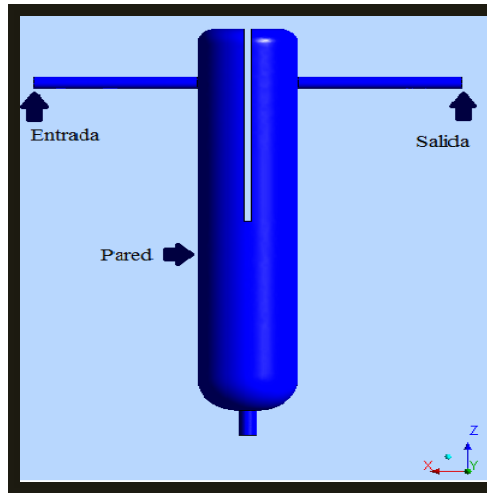


Figura 4.1 Regiones donde se asignan las condiciones de borde

-Entrada

En este nivel se toman en consideración datos y propiedades a la entrada del equipo de control de sólidos. La velocidad fijada fue de 3,907 m/s y es característica de los pozos en los cuales se basó el estudio de Andueza [1]. De esta misma referencia se obtuvo el procedimiento mediante el cual se define el tamaño de partícula.

A continuación se da una detallada descripción de dicha metodología.

Como no se poseen datos concretos en lo que se refiere a la cantidad de partículas se procedió a definir una fracción volumétrica.

Este concepto plantea una relación entre el volumen de las partículas y el de la tubería de entrada, de la siguiente manera:

$$\text{Frac. Vol. de Partículas}(\varphi) = A_{up} / A_{tt} \quad (4.1)$$

Donde A_{tp} es el área transversal total de las partículas de arena y A_{tt} , es el área transversal total de la tubería.

Tomando en consideración una fracción φ de 0,001 entonces se puede determinar el valor aproximado de A_{tp} despejando de la ecuación 4.1 como se muestra:

$$A_{tp} = (\varphi * A_{tt}) = (0,001 * 0,008107m^2) = 0,000008107m^2$$

El flujo másico de partículas se obtiene de la siguiente forma:

$$\dot{m}_{part} = \rho_{arena} * A_{tp} * V_{part} \quad (4.2)$$

$$\dot{m}_{part} = (2500 \text{ Kg/m}^3) * (0,000008107m^2) * (3,907 \text{ m/s}) = 0,079189 \text{ Kg/s}$$

Donde, \dot{m}_{part} es el flujo másico de partícula y V_{part} es la velocidad de la partícula que se asume es la misma que el fluido para estos cálculos a la entrada del equipo.

En base a esto, el número de partículas será:

$$N^{\circ} \text{ de partículas} = A_{tp} / \text{Área de una partícula} \quad (4.3)$$

Como se manejan varios diámetros, a continuación se presenta en la tabla 4.1 los datos del número y tamaños de partículas para cada uno de ellos para una fracción volumétrica $\varphi=0,001$:

Tabla 4.1 Datos de números de partículas para distintos diámetros con $\phi=0,001$ y un flujo másico de partículas de 0,07918 Kg/s

| Diámetro (μm) | A_{tp} (m^2) | Número de partículas |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 30 | 7,067E-10 | 11471 |
| 40 | 1,256E-09 | 6452 |
| 50 | 1,963E-09 | 4129 |
| 100 | 7,853E-09 | 1032 |
| 200 | 3,141E-08 | 258 |
| 300 | 7,067E-08 | 114 |
| 400 | 1,256E-07 | 64 |
| 700 | 3,848E-07 | 21 |
| 1000 | 7,852E-07 | 10 |

Para el caso de la fracción volumétrica de $\phi= 0,0001$ los valores correspondientes para número de partículas se muestran en la tabla 4.2

Tabla 4.2 Datos de números de partículas para distintos diámetros con $\phi=0,0001$ y un flujo másico de partículas 0,007918 Kg/s

| Diámetro (μm) | Attp (m^2) | Número de partículas |
|----------------------------|-----------------------|----------------------|
| 30 | 7,067E-11 | 1147 |
| 40 | 1,256E-10 | 645 |
| 50 | 1,963E-10 | 412 |
| 100 | 7,853E-10 | 103 |
| 200 | 3,141E-09 | 25 |
| 300 | 7,067E-09 | 11 |
| 400 | 1,256E-08 | 6 |
| 700 | 3,848E-08 | 2 |
| 1000 | 7,852E-08 | 1 |

Es importante mencionar el hecho de que la ubicación de las partículas a la entrada fue al azar y con inyección uniforme. En cuanto a la intensidad de la turbulencia se toma la que se da por defecto (Mediana 5%) por recomendación del software.

-Salida

En esta frontera se especificó el dato de presión estática en un valor de 10 Psi, basándose en un promedio obtenido de la data suministrada por Andueza ^[1] quien además determinó en su estudio que la variación de la presión a la salida no afecta en los resultados de remoción.

-Pared

Esta región abarca todas las superficies de la geometría a excepción de las mencionadas entrada y salida. Se consideró que el fluido está rodeado por una pared lisa y en una condición de no deslizamiento.

La figura 4.2 muestra una vista de la previa del dominio con sus condiciones de borde definidas.

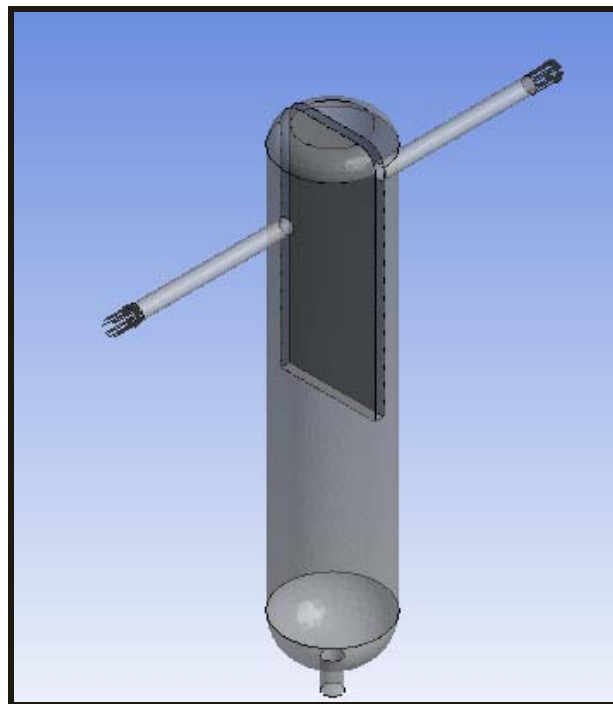


Figura 4.2 Dominio final con las condiciones de borde definidas

4.2 Especificación de las opciones del solucionador

Aquí se definen los intervalos de iteraciones, número máximo de iteraciones, método y criterio de convergencia entre otros aspectos necesarios para el montaje de la simulación. Las opciones manejadas se editaron en el “Control de Solucionador” (Solver Control) y se muestran a continuación:

□ Esquema de Advección: se implementó el de diferencias en *Upwind* de primer orden.

□ Control de la Escala de tiempo: se utilizó el *Autotimescale* para las corridas con fracción volumétrica de 0,001 y 0,0001. Para las corridas con fracción volumétrica de 0,005, se utilizó la opción de *Physical Timescale* cuyo valor estuvo en 0,05s para ayudar a la convergencia.

□ Límite Residual: se fijó en 0,0001 aunque para las corridas en Fully Coupled con fracción volumétrica de 0,005 se trabajó con un límite de 0,0005.

□ Control de la partícula: en muchas ocasiones, las partículas pueden tener diferentes trayectorias y pueden tomar diversos tiempos para hacer el recorrido por el dominio, por lo que se recomienda ampliar los valores de distancia y tiempo máximo de recorrido de las partículas. En este caso se utilizaron valores de Distancia máxima de 20 m y tiempo máximo 1000 s.

4.3 Discretización del modelo

Luego de la creación del modelo físico, se procede a realizar el mallado o discretización de la geometría. Esto consiste en dividir la geometría en pequeños volúmenes de control finitos. La unión de todos estos volúmenes de control es lo que se denomina malla o red computacional. Las ecuaciones fundamentales son aplicadas a cada uno de dichos elementos y la resolución del problema se da por medio de un proceso iterativo en el cual interactúan todas las ecuaciones de todos los elementos entre sí.

La calidad de la malla se puede estimar en función a la cantidad de elementos, es decir, a mayor cantidad de estos, se tiene una mayor y mejor distribución de puntos

de control a lo largo de la geometría. Con mayor cantidad de elementos el estudio se hace más preciso, debido a que brinda mayor sensibilidad al momento de detectar cambios y esto permite que el comportamiento de los fenómenos y la evolución de las propiedades sean más cercanos a la realidad.

Para el estudio del desarenador en cuestión, el software computacional permitió la discretización total de la geometría, utilizando una serie de opciones especializadas que ofrece.

El software brinda una importante gama de opciones para refinar la malla, las principales son el “Face Spacing” (Espaciamiento superficial) y “Body Spacing”(Espaciamiento volumétrico); estas se orientan a determinar el tamaño de las caras y volúmenes de los elementos. También existen los llamados “Inflations” que genera elementos en forma de capas alrededor de las superficies cercanas a la pared, utilizado básicamente para estudiar fenómenos relacionados con capa límite. Otra de las opciones son los “Controls” (Controles) que son puntos, líneas o superficies triangulares alrededor de las cuales se puede refinar la malla dándoles dimensiones diferentes y regulándolas mediante un radio de influencia.

4.4 Sensibilidad de la malla

La elaboración de la malla se ajustó a las necesidades que requería el problema. Si bien es cierto que mientras más fina sea la malla, los resultados serán más precisos, el alto costo computacional que genera trabajar con una gran cantidad de elementos representa una limitante. Es por esto que debe previamente estudiarse el fenómeno para luego manejar las opciones del mallado.

En este estudio, la prioridad se basa en determinar el porcentaje de remoción por lo que se requiere de una calidad de elementos que permita modelar

correctamente el movimiento del fluido a lo largo del desarenador, así como también la interacción del mismo con respecto a la fase dispersa. Con base a esto, lo importante sería dar una dimensión pequeña en los espaciamientos que reproduzca una cantidad suficiente de elementos. Del mismo modo, se puede acotar que no es indispensable hacer un estudio detallado de lo que sucede a nivel de las zonas cercanas a la pared, por tal motivo no es necesario hacer énfasis en el refinamiento del las inflaciones.

Otra de las características importantes de la malla empleada fue la opción de Avance Frontal e Inflación con el cual se generaron las caras triangulares basándose en el método Delaunay y el de Avance Frontal para la formación de los volúmenes.

A continuación se muestran en la tabla 4.3, las propiedades de la malla que se implementó:

Tabla 4.3 Características del mallado utilizado

| Espaciamiento Superficial | | Inflaciones | |
|---------------------------|--------|---------------------|-----------|
| Resolución Angular | 18 | # de Capas | 7 |
| Max Longitud | 0.2'' | Factor de expansión | 1,3 |
| Min Longitud | 0.02'' | Max longitud | 0,06667'' |
| Espaciamiento Volumétrico | | 0,3'' | |

En la figura 4.3 se muestra la vista del mallado superficial generado por el software en base a las especificaciones antes mencionadas en la tabla 4.3.

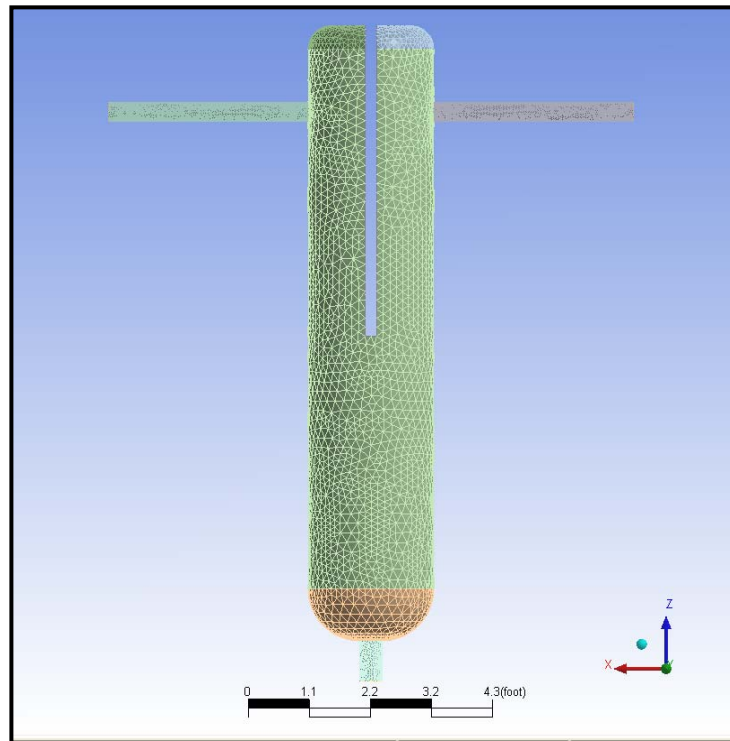


Figura 4.3 Mallado generado

El efecto de las inflaciones se puede evidenciar claramente en las zonas cercanas a la pared. Los elementos se reproducen en capas superpuestas como se observa en la figura 4.4.

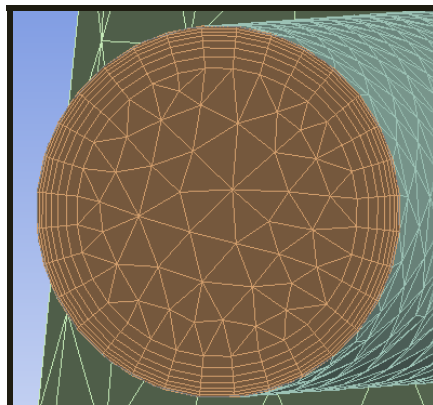


Figura 4.4 Efecto de las inflaciones

Para variar la densidad de malla se trabajó cambiando la Escala Global del Mallado (Global Mesh Scaling) con valores de 1 a 0,6. Mientras menor es la escala, mayor es la cantidad de elementos generados.

Tabla 4.4 Cantidad de elementos correspondientes por cada escala

| Malla | Escala | Número de elementos |
|-------|--------|---------------------|
| 1 | 1,0 | 112.449 |
| 2 | 0,9 | 130.899 |
| 3 | 0,8 | 165.834 |
| 4 | 0,7 | 308.836 |
| 5 | 0,6 | 422.053 |

4.4.1 Sensibilidad de malla en términos de velocidad

Para el montaje de la simulación de la sensibilidad de la malla se consideraron 2 fases, la continua (representada por el crudo) y la dispersa (partículas de arena). Aunado a esto, se asumió que el proceso se daba en estado estacionario y se seleccionó un modelo de turbulencia k- ϵ y un acoplamiento completo de las partículas de arena. Inicialmente se utilizaron 50 partículas de 50 micrones.

En la figura 4.5 se muestra un esquema de las líneas en donde se evaluó la evolución de la velocidad. Se presenta una línea vertical y una horizontal y sus coordenadas

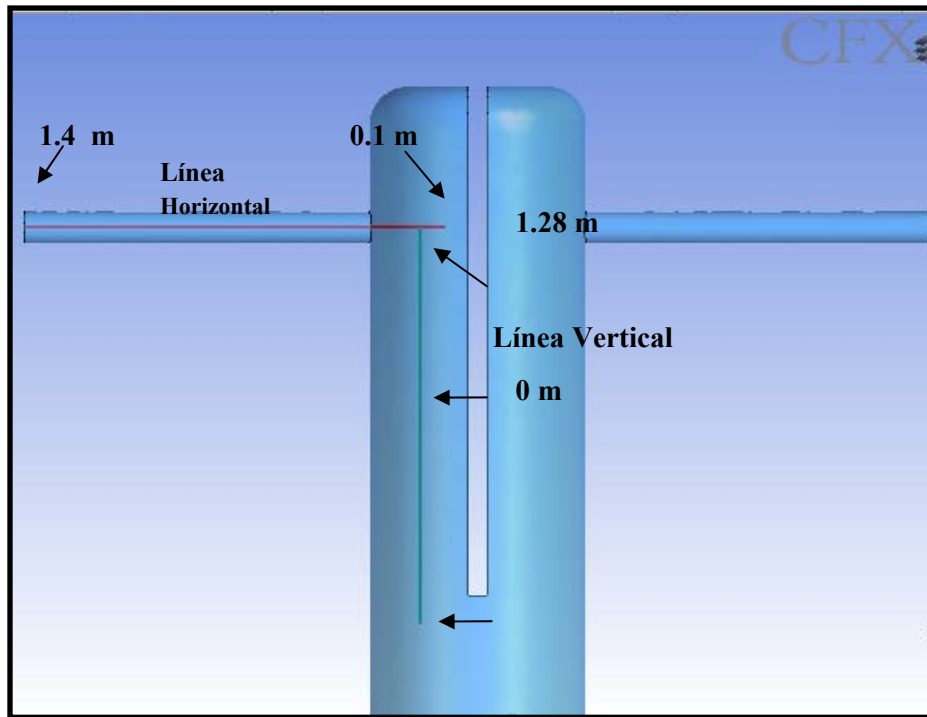


Figura 4.5 Líneas de velocidad y coordenadas principales

En la tabla 4.5 se muestran los valores de velocidad obtenidos para cada una de las mallas en diferentes posiciones de la línea horizontal

Tabla 4.5 Valores de velocidad obtenidos en la línea horizontal en m/s

| Posición (m) | Malla 1 | Malla 2 | Malla 3 | Malla 4 | Malla 5 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,4 | 3,9063 | 3,9065 | 3,9085 | 3,9075 | 3,9075 |
| 1,2 | 3,9943 | 4,0041 | 4,0349 | 4,0145 | 3,9957 |
| 1,0 | 4,0688 | 4,0676 | 4,1233 | 4,0874 | 4,0673 |
| 0,8 | 4,1341 | 4,1288 | 4,1824 | 4,1458 | 4,1274 |
| 0,6 | 4,1784 | 4,1824 | 4,2183 | 4,1945 | 4,1611 |
| 0,4 | 4,1863 | 4,2021 | 4,2332 | 4,2044 | 4,1635 |
| 0,2 | 2,7213 | 2,6867 | 2,9442 | 2,8902 | 3,0090 |
| 0,1 | 1,5083 | 1,6676 | 1,7326 | 1,8535 | 1,9466 |

En base a las velocidades obtenidas se observan cierta variaciones entre cada una de las mallas, esto se cuantificó determinando un porcentaje de error tomando como referencia la malla más fina (malla 5):

$$\%Error = \frac{|X_n - X_f|}{X_f} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Siendo X_n el valor de la variable en cualquier malla “n” y X_f el valor de la variable en la malla más fina.

La tabla 4.6 refleja los porcentajes de error correspondientes a cada malla en relación a la más fina (escala 0,6) calculados en base a la ecuación 4.1

Tabla 4.6 Porcentaje de error con respecto a la malla más fina en la línea horizontal

| Posición (m) | Malla 1 | Malla 2 | Malla 3 | Malla 4 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|
| 1,4 | 0,0302 | 0,0240 | 0,0266 | 0,0112 |
| 1,2 | 0,0360 | 0,2104 | 0,9817 | 0,4755 |
| 1,0 | 0,0371 | 0,0066 | 1,3770 | 0,4919 |
| 0,8 | 0,1613 | 0,0341 | 1,3318 | 0,4368 |
| 0,6 | 0,4147 | 0,5097 | 1,3726 | 0,7920 |
| 0,4 | 0,5488 | 0,9280 | 1,6735 | 0,9871 |
| 0,2 | 9,5609 | 10,7097 | 2,1535 | 3,9375 |
| 0,1 | 22,5197 | 14,3315 | 10,9941 | 4,7855 |

En la tabla 4.7 se muestran los valores de velocidad obtenidos a lo largo de la línea vertical para cada una de las mallas. Estos valores comprenden desde la entrada el extremo inferior de la placa hasta la altura media de la tubería de entrada como se indicó previamente en la figura 4.5

Tabla 4.7 Valores de velocidad obtenidos en la línea vertical en m/s

| Posición (m) | Malla 1 | Malla 2 | Malla 3 | Malla 4 | Malla 5 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1,28 | 3,5741 | 3,6340 | 3,7027 | 3,7167 | 3,7438 |
| 0,8 | 0,1537 | 0,1330 | 0,1310 | 0,1341 | 0,1800 |
| 0,4 | 0,1140 | 0,1149 | 0,1322 | 0,1452 | 0,1903 |
| 0,0 | 0,0422 | 0,0498 | 0,0560 | 0,0546 | 0,0679 |

Para la línea vertical, los valores de porcentaje de remoción se reflejan en la tabla 4.8

Tabla 4.8 Porcentaje de error con respecto a la malla más fina (0,6) en la línea vertical

| Posición (m) | Malla 1 | Malla 2 | Malla 3 | Malla 4 |
|--------------|---------|---------|---------|---------|
| 1,28 | 4,5320 | 2,9309 | 1,0983 | 0,7222 |
| 0,8 | 14,6053 | 26,1037 | 27,1842 | 25,4821 |
| 0,4 | 40,0730 | 39,6085 | 30,5343 | 23,6829 |
| 0,0 | 37,8144 | 26,6906 | 17,5123 | 19,6451 |

Tanto en la línea horizontal como en la línea vertical, los porcentajes de error en términos generales mejoran a medida que usa una malla más fina. En las figuras 4.6 y 4.7 se reafirma lo mencionado anteriormente en relación a como mejora el error a medida que se refina la malla.

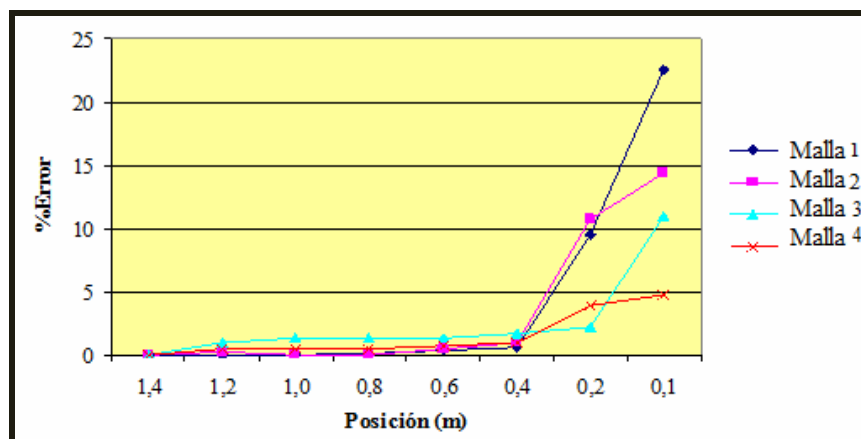


Figura 4.6 Porcentaje de error en función a la posición en la línea horizontal

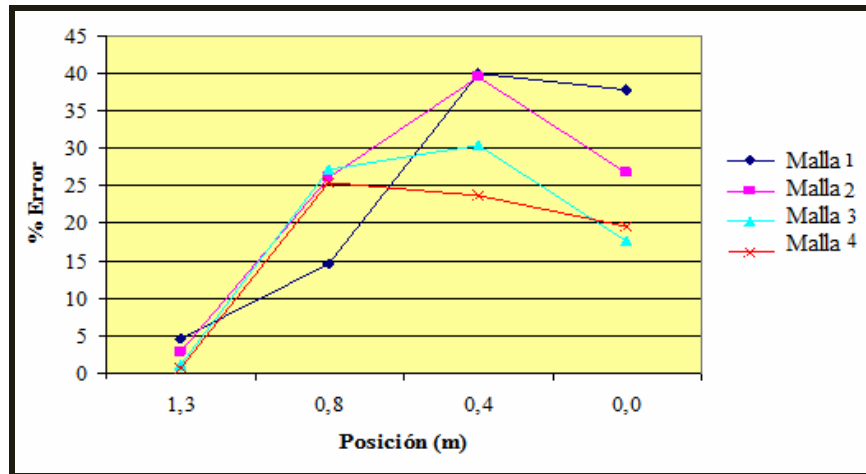


Figura 4.7 Porcentaje de error en función a la posición en la línea vertical

En términos de ingeniería es recomendable manejar porcentajes de error menores al 5%, lo que los resultados que se muestran solo se cumple en la línea horizontal. Para la línea vertical se observa un aumento considerable de los porcentajes de error y esto se debe en gran proporción a que en las zonas bajas del sistema se lleva a cabo la expansión del espacio del flujo del fluido donde se generan, importantes variaciones de velocidad. La turbulencia en estas zonas es realmente predominante, por lo que buscar un porcentaje de error de 5% es una tarea que implicaría un inmenso costo computacional que complicaría en demasía el estudio.

Por esta razón se realizó un estudio en pro de determinar si el porcentaje de remoción se veía realmente afectado por dichas variaciones en la malla. A ciencia cierta es la remoción el principal fenómeno a estudiar en esta investigación por lo que el mayor peso del criterio de selección recaerá sobre este.

4.4.2 Sensibilidad de malla en términos de porcentaje de remoción

Para este estudio se mantuvieron las mismas condiciones que en el estudio aplicado a velocidad y además se planteó con otros tamaños de partículas (50 μ m, 200 μ m y 400 μ m) para darle un enfoque más general y mayor validez al estudio.

4.4.2.1 REMOCIÓN PARA 50 PARTÍCULAS DE 50 MICRONES

Inicialmente, el estudio de remoción se hizo en base a las mismas corridas que se utilizaron para el estudio de sensibilidad de la malla con velocidad. la metodología del cálculo del porcentaje de remoción se explicará en la sección 5.2.

En la tabla 4.9 se muestran los resultados de porcentaje de remoción para cada una de las mallas.

Tabla 4.9 Resultados de remoción obtenidos para 50 partículas de 50 micrones

| Malla | Malla 1 | Malla 2 | Malla 3 | Malla 4 | Malla 5 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| % Remoción | 24,002 | 9,993 | 7,999 | 13,994 | 15,995 |

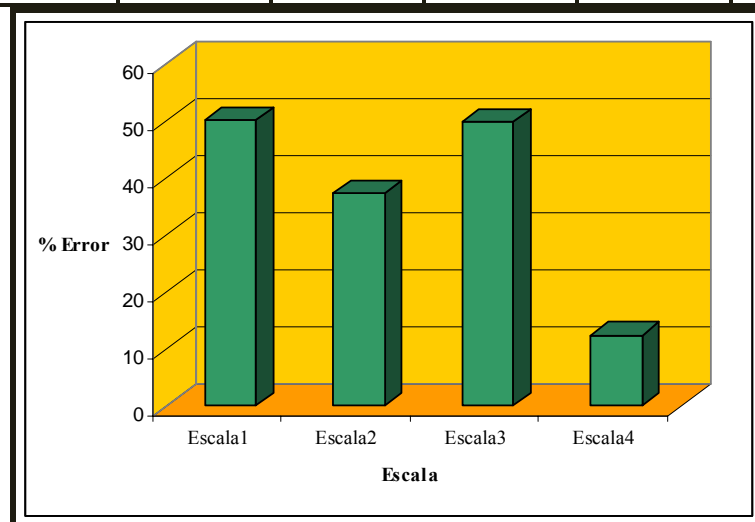


Figura 4.8 Porcentaje de error con 50 partículas de 50 micrones

En la figura 4.8 se muestran los porcentajes de error obtenidos para cada una de las mallas usadas. Aquí, se observan altos errores, sin embargo estos están causados por la poca cantidad de partículas y las pequeñas dimensiones que estas poseen. La tendencia de estas partículas es a seguir el flujo y al ser solo 50 cada partícula representa un 2% de error. Es lógico pensar que para estas partículas las variaciones de remoción, con el uso de distintas mallas sean grandes. A pesar de esto se nota una tendencia a disminuir el error a medida que se refina la malla.

4.4.2.2 REMOCIÓN PARA 100 PARTÍCULAS DE 200 MICRONES

Para este estudio solo se cambió el flujo másico de la fase dispersa, ajustándolo a los nuevos valores de números y tamaño de partículas. En la tabla 4.10 se presentan los resultados del porcentaje de remoción para este caso con 200 μ m.

Tabla 4.10 Resultados de remoción obtenidos para 100 partículas de 200 micrones

| Malla | Malla 1 | Malla 2 | Malla 3 | Malla 4 | Malla 5 |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| % Remoción | 50,001 | 54,000 | 57,000 | 58,000 | 59,999 |

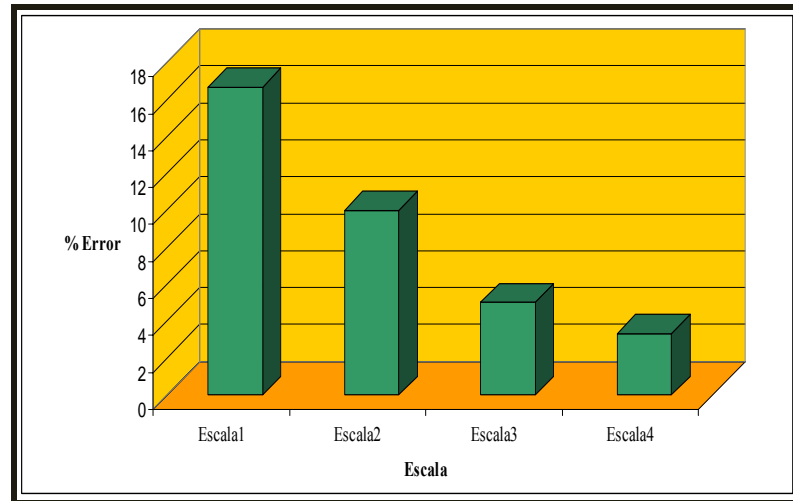


Figura 4.9 Porcentaje de error con 100 partículas de 200 micrones

En la figura 4.8, se observa que al aumentar el número de partículas y su diámetro existe una clara tendencia disminuir progresivamente el porcentaje de error. A diferencia del caso anterior, en presencia de un mayor número de partículas disminuye la tasa por cada partícula a 1%. La tendencia a mejorar se debe a que al tener mayor masa, las partículas dejan de seguir fielmente al flujo y empiezan a interactuar entre sí, a tener una inercia suficiente para resistirse al movimiento y a ceder ante la gravedad. Esto implica que las partículas mantienen una tendencia a independizar su trayectoria y esto se va a ver reflejado con claridad en la remoción, sea cual sea la malla utilizada.

4.4.2.3 REMOCIÓN PARA 100 PARTÍCULAS DE 400 MICRONES

En este caso, se toma un diámetro 400 μ m, que representan partículas con una masa considerable en relación a los casos anteriores (50 y 200 μ m). Los valores de remoción se muestran a continuación en la tabla 4.11

Tabla 4.11 Valores de remoción obtenidos para 100 partículas de 400 micrones

| Malla | Malla 1 | Malla 2 | Malla 3 | Malla 4 | Malla 5 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| % Remoción | 83,000 | 86,000 | 88,000 | 89,004 | 92,000 |

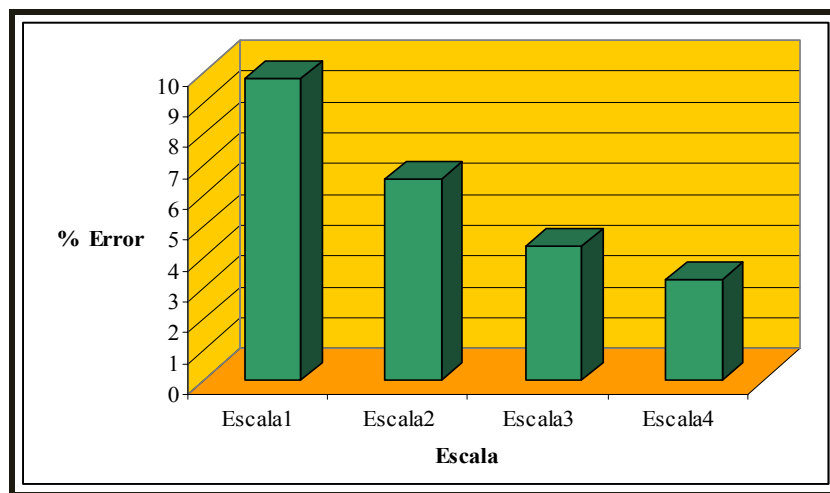


Figura 4.10 Porcentaje de error con 100 partículas de 400 micrones

La figura 4.10 refleja claramente como el porcentaje de error se reduce considerablemente a medida que se mejora la malla, alcanzando incluso valores menores a 5% para mallas poco refinadas como la malla 3 (Escala 0,8).

Como era de esperarse ya con mayor diámetro, el efecto de la gravedad predomina el fenómeno causando así una alta remoción y una disminución en el error en lo que a remoción se refiere.

4.4.2.4 JUSTIFICACIÓN DE LA MALLA SELECCIONADA

Con base a lo observado, se trabajará con la malla correspondiente a la *Escala 4 (0,7)* ya que presentó los errores más bajos en los casos estudiados. Por otro lado, si

bien es cierto que presentaron errores de hasta un 12% para partículas de 50 micrones, hay que tomar en consideración que se manejaron solo 50 partículas. Esto para el desarrollo de esta investigación no aplica del todo ya que para partículas de pequeños diámetros se va a tomar una mayor cantidad de unidades a la entrada, para mantener la fracción volumétrica constante. En cambio, a nivel de partículas de 200 y 400 micrones presentó buenos resultados en lo relativo al porcentaje de error. Esto tiene gran peso ya que el número de partículas es representativo y semejante a lo utilizado para el cumplimiento de los objetivos planteados.

CAPITULO V

RESULTADOS Y ANALISIS

5.1 Criterio de Convergencia

La convergencia se definió con base a “La Raíz de los residuales Cuadrados” (RMS), se consideró el valor recomendado por el software de 0,0001. Sin embargo, para las corridas de alto requerimiento computacional (fracción volumétrica de 0,05) se acordó un valor de convergencia de 0,0005.

Las gráficas de convergencia para las corridas One Way Coupling mostraron un comportamiento suave, como se muestra a continuación en la figura 5.1

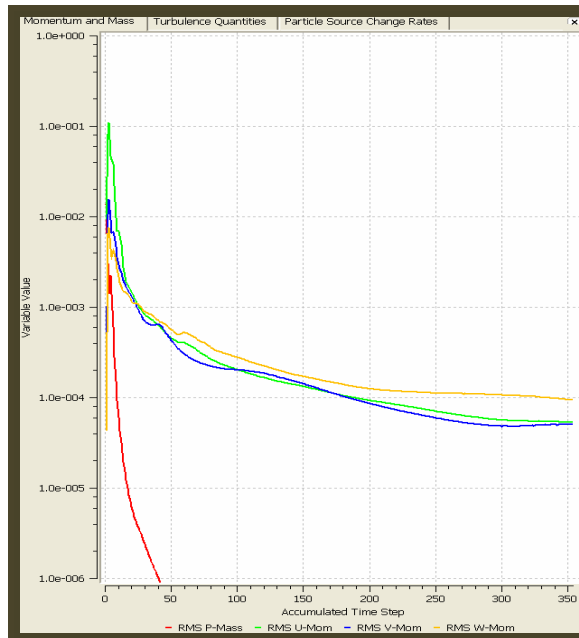


Figura 5.1 Gráfica de convergencia para 10 partículas de 1000 micrones en One Way Coupling

Por otro lado, las corridas “Fully Coupled” tienen un comportamiento similar, aunque el tiempo de convergencia y el número de iteraciones aumenta considerablemente. Además en esta modalidad se genera otra gráfica de convergencia, relacionada con la trayectoria de partículas. Ambas se muestran en la figura 5.2

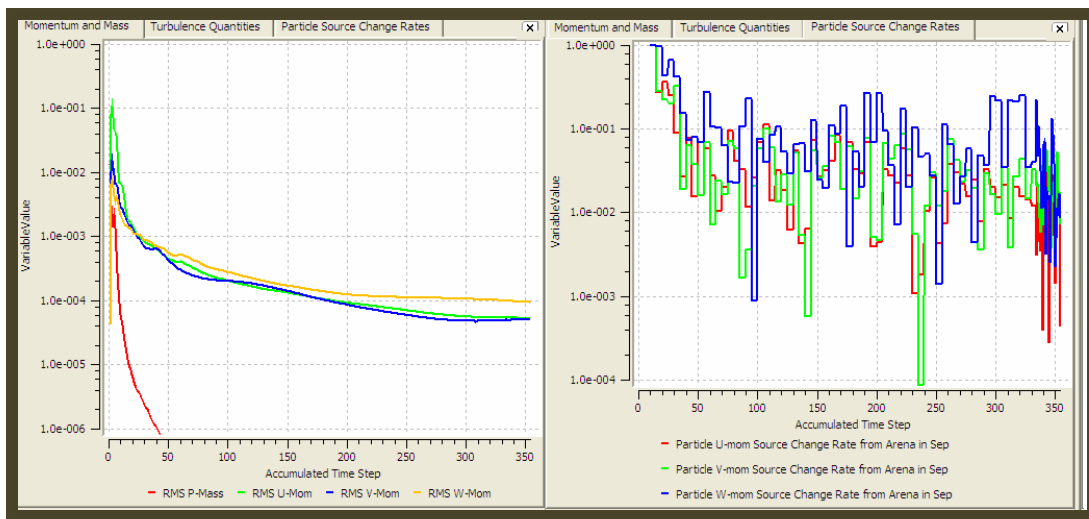


Figura 5.2 Gráfica de convergencia para 10 partículas de 1000 micrones en Fully Coupled

5.2 Estudio de la remoción

Para estudiar la remoción se trabajó con partículas de 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400, 700 y 1000 micrones. Se hicieron simulaciones tanto en One Way Coupling como en Fully Coupled. El criterio para el cálculo de la remoción se basó en la ecuación 5.1 que se muestra a continuación:

$$\%Rem = (DFME - DFMS) * 100 / DFME \quad (5.1)$$

Donde, DFME es la densidad de flujo másico a la entrada y es constante ya que al fijar del flujo volumétrico esto no varía. DFMS es la densidad de flujo másico de salida. Ambos valores se obtienen cuantitativamente por medio de la función “Calculadora de Propiedades” que ofrece el Software utilizado.

El estudio del efecto de la remoción se realizó en base a 2 fracciones volumétricas $\varphi=0,001$ y $\varphi=0,0001$ para las cuales se obtuvo el porcentaje de remoción de arena.

5.2.1 Estudio de la remoción para $\varphi=0,001$

A continuación, en la tabla 5.1 se presentan los valores de remoción obtenidos para los 9 tamaños de partículas para las dos modalidades de simulación de partículas utilizadas. En este cuadro comparativo se plantea además el porcentaje de diferencia entre ambos casos. El valor correspondiente a la densidad de flujo másico de entrada es la correspondiente a la de la fracción volumétrica $\varphi= 0,001$

Tabla 5.1 Resultados de porcentaje de remoción para diferentes tamaños de partículas para una densidad de flujo másico de entrada 9,83083 Kg/m².s en las modalidades de One Way Coupling y Fully Coupled para $\phi=0,001$

| Diámetro (μm) | One way Coupling | | Fully Coupled | | % Diferencia |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|--------------|
| | DFMS (Kg/m ² .s) | Remoción % | DFMS (Kg/m ² .s) | Remoción % | |
| 30 | 9,439 | 3,98 | 9,513 | 3,227 | 0,25 |
| 40 | 9,424 | 4,13 | 9,386 | 4,521 | 9,28 |
| 50 | 9,417 | 4,20 | 6,859 | 30,225 | 619,73 |
| 100 | 9,335 | 5,03 | 5,677 | 42,248 | 738,67 |
| 200 | 6,858 | 30,23 | 2,667 | 72,868 | 141,03 |
| 300 | 4,829 | 50,87 | 2,328 | 76,316 | 50,00 |
| 400 | 1,843 | 81,25 | 0,768 | 92,188 | 13,46 |
| 700 | 0,000 | 100,00 | 0,000 | 100,000 | 0,00 |
| 1000 | 0,000 | 100,00 | 0,000 | 100,000 | 0,00 |

Para complementar el análisis del comportamiento de las partículas, es necesario considerar el estudio del “Número de Stokes” y la “Velocidad de Sedimentación Adimensional” que son parámetros teóricos, que reflejan ciertos comportamientos característicos.

Para determinar el número de Stokes se partió de la ecuación:

$$St = \frac{\tau_p}{T_k} \quad (5.2)$$

Donde τ_p es el tiempo de respuesta de la partícula y se calcula de la siguiente manera:

$$\tau_p = \frac{\rho_{particula} \cdot d^2}{18 \cdot \mu_{fluido}} \quad (5.3)$$

Donde ρ_{part} es la densidad de la partícula; μ_{fluido} es la viscosidad dinámica del fluido y d el diámetro de la partícula.

Si se toma como punto de partida que las partículas pueden ser afectadas por el remolino más pequeño (Torbellino de Kolmogorov), el tiempo característico del fluido T_k se puede determinar a partir de la relación:

$$T_k = \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (5.4)$$

Siendo, ν la viscosidad dinámica y ε la disipación de Eddy. Esta última se obtiene en base a la expresión:

$$\varepsilon = C_\mu \cdot K^2 \cdot \frac{1}{lm^2 \cdot \left| \frac{du}{dy} \right|} \quad (5.5)$$

Donde K es la energía cinética de turbulencia, lm es la longitud de mezcla y vale $0,14\delta$ y $\frac{du}{dy}$ el gradiente de velocidad, C_μ es una constante obtenida empíricamente y δ es una distancia medida desde la pared.

Por otro lado el valor de K se obtiene por la relación:

$$K = C_{\mu}^{-1/2} \cdot \left(lm \frac{du}{dy} \right) \quad (5.6)$$

Sustituyendo K en la ecuación 5.5 se obtiene que:

$$\varepsilon = lm^2 \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^3 \quad (5.7)$$

Para la determinación del gradiente se considera una aproximación polinómica del perfil de velocidad desarrollado dentro del desarenador.

$$\frac{u}{\overline{u_x}} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/h} \quad (5.8)$$

Siendo $\overline{u_x}$ la velocidad promedio, y la posición, δ el espacio del ducto donde se desarrolla el perfil y h una constante de turbulencia. Para nuestro estudio se tomó arbitrariamente $h=7,5$

Ahora, el gradiente viene dado de derivar la ecuación 5.8, resultando

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{h} \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{h}-1} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \overline{u_x} \quad (5.9)$$

Tomando el mayor valor del gradiente en $y=\delta_y$:

$$\frac{du}{dy} = \frac{2}{15} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \overline{u_x} \quad (5.10)$$

Sustituyendo este gradiente en la ecuación de la disipación y la aproximación de longitud de mezcla *lm* de $0,14\delta$, se obtiene:

$$\varepsilon = 0.00464 \frac{(\bar{u})^3}{\delta} = 18,98 \text{ m}^2/\text{s}^3 \quad (5.11)$$

El valor de la velocidad promedio del recipiente \bar{u} se determina por la expresión:

$$\bar{u} = \frac{Q}{A_t} \quad (5.12)$$

Donde el Q es el caudal y A_t es el área de la mitad de la sección transversal de recipiente como se muestra en la figura 5.3^[1] Adicionalmente el valor de δ es de 0,34m, que corresponde a la distancia entre la placa y la entrada del desarenador (Ver figura 5.3) con estos datos se obtiene un valor aproximado de la disipación de **18 m²/s³**:

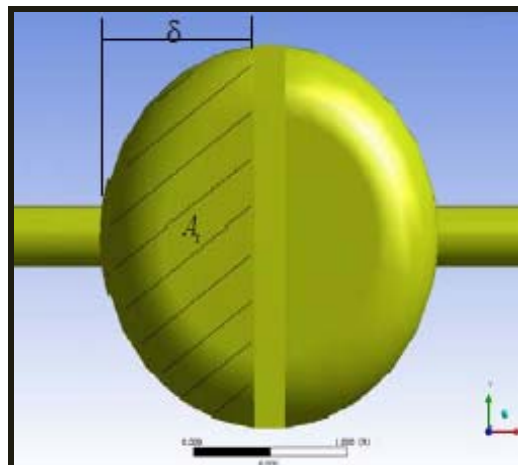


Figura 5.3 Área transversal del recipiente con la placa

Finalmente el tiempo característico del fluido T_k se puede obtener y tiene un valor de:

$$T_k = 0,0003s$$

Sabiendo que la viscosidad del fluido es $\nu = 1,532 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$

En cuanto a la velocidad de sedimentación adimensional S_v se obtiene mediante la expresión:

$$S_v = \frac{g \cdot St}{(V_k / T_k)} \quad (5.13)$$

Donde g es la gravedad, St es el Número de Stokes, V_k la velocidad característica del fluido y T_k es el tiempo característico.

La V_k de Kolmogorov se obtiene de la siguiente manera

$$v_k = (\nu \cdot \varepsilon)^{1/4} = 0,0734 \text{m/s} \quad (5.14)$$

Otro valor importante es el tamaño del Eddy de Kolmogorov corresponde al tamaño más pequeño de la estructura de la turbulencia y se obtiene de la expresión^[15]:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (5.15)$$

Utilizando los valores previamente obtenidos, se tiene que el tamaño del Eddy vale $21,32\mu\text{m}$.

Este valor obtenido para el Eddy de Kolmogorov es cercano a los diámetros de partículas de arena manejados en este estudio. Esto quiere decir que las partículas pueden verse afectadas por este nivel de turbulencia, lo cual da validez a las expresiones de T_k y S_v .

A continuación en la tabla 5.4 se muestran los valores de St y S_v para los distintos tamaños 9 tamaños de partículas en estudio.

Tabla 5.2 Valores de número de stokes y de velocidad de sedimentación adimensional para todos los tamaños de partículas para una densidad de la partículas de $P=2500 \text{ KG/M}^3$ y un fluido de viscosidad $\mu=0,0011684 \text{ KG/M.S.}$ considerando una velocidad a la entrada de del recipiente de $3,7343 \text{ M/S}$ y un tiempo característico de $0,0003 \text{ s}$

| D (m) | \hat{O}_p (s) | St | Sv |
|------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| 0,000030 | 0,0000714 | 0,35661 | 0,01438 |
| 0,000040 | 0,0001270 | 0,63398 | 0,02602 |
| 0,000050 | 0,0001984 | 0,99059 | 0,04066 |
| 0,000100 | 0,0007937 | 3,9624 | 0,16263 |
| 0,000200 | 0,0031746 | 15,8495 | 0,65056 |
| 0,000300 | 0,0071429 | 35,6613 | 1,46375 |
| 0,000400 | 0,0126984 | 63,3979 | 2,60223 |
| 0,000700 | 0,0388889 | 194,1559 | 7,96933 |
| 0,001000 | 0,0793651 | 396,2367 | 16,2639 |

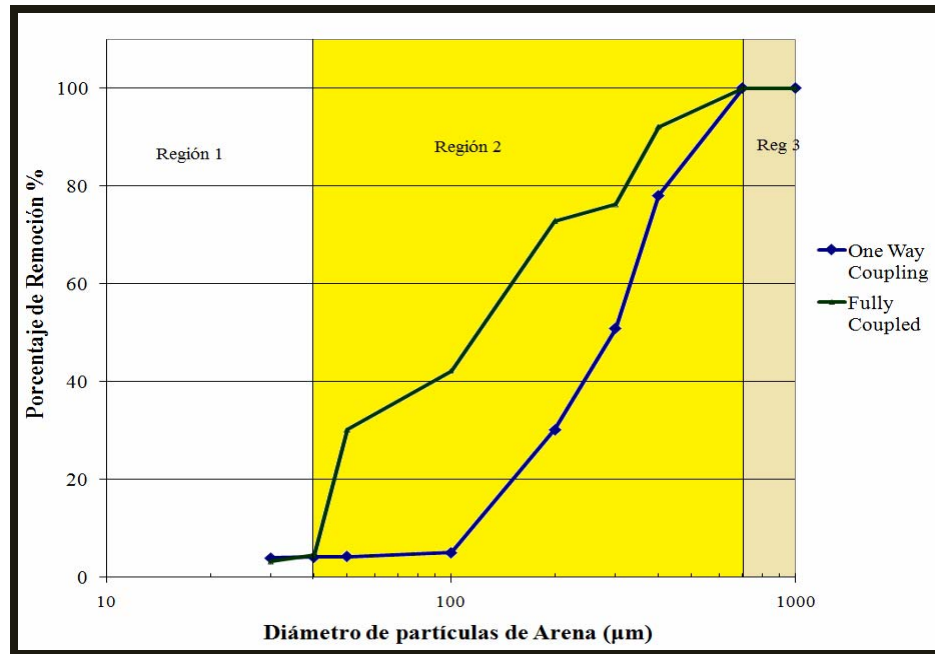


Figura 5.4 Gráfica comparativa del porcentaje de remoción para diversos tamaños de partículas en One Way Coupling y Fully Coupled para $\phi=0,001$

La figura 5.4 muestra la variación de la remoción en términos del diámetro de las partículas. De la figura se identifican 3 regiones donde se observan comportamientos característicos distintos en la remoción de las partículas y son regidos por diferentes fenómenos físicos que se explicarán a continuación.

Región 1.- Predominio del flujo

La primera de estas zonas comprende de los diámetros de partículas menores a $40\mu\text{m}$; allí se evidencia que tanto la curva One Way Coupling como la de Fully Coupled tienen valores de remoción muy parecidos con una tendencia a aumentar levemente con el tamaño de la arena. Este fenómeno tiene su explicación en el hecho de que con dimensiones de partículas muy pequeñas, predomina el efecto del fluido

sobre ellas, generando que sean arrastradas por el mismo y por lo que el valor de la remoción es siempre bajo.

En las figuras 5.5 a y 5.5 b y se observa que para 30 micrones existen importantes regiones con flujos secundarios hacia las zonas bajas e intermedias del recipiente. Este mismo patrón se repite para 40 micrones como se evidencia en las figuras 5.6 a y 5.6 b.

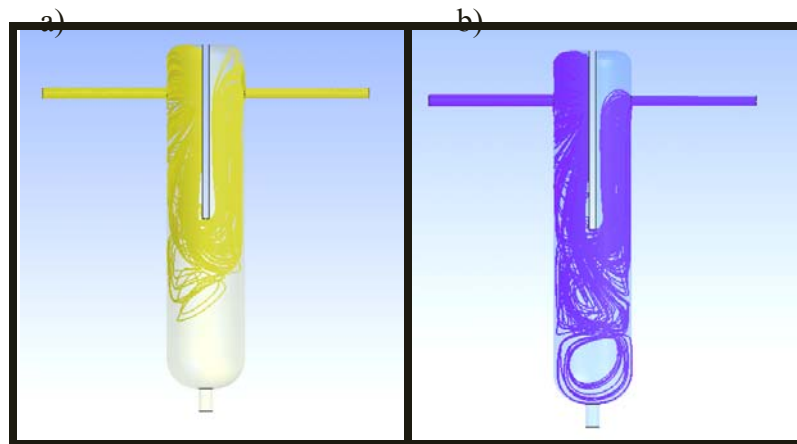


Figura 5.5 Comportamiento de las partículas de 30 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

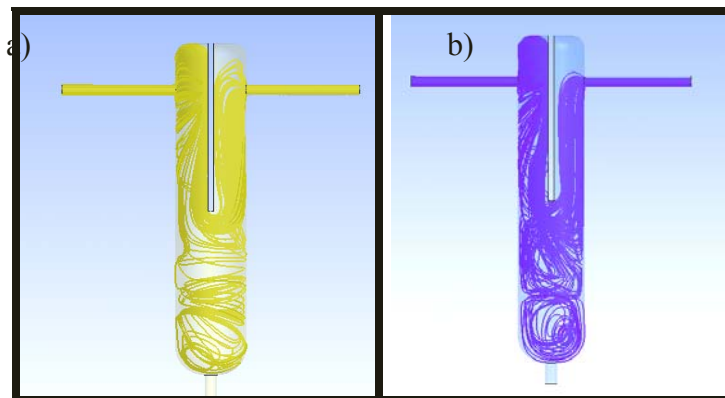


Figura 5.6 Comportamiento de las partículas de 40 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

Pese a que la presencia de vórtices debería favorecer el porcentaje de remoción, para partículas con diámetros pequeños los flujos secundarios no generan mayor efecto de separación. Esto se debe a que la masa de las partículas no posee una inercia suficiente como para deslindarse de las líneas de crudo.

La explicación para este fenómeno se apoya además en la teoría del número adimensional des Stokes. Esto por el hecho de que para $St \ll 1$ las partículas siguen mejor a las líneas de corriente del flujo. A partir de 40 micrones se observa que la remoción aumenta en ambos métodos de simulación. El punto en el que comienza este aumento se puede estimar como un punto crítico. Punto a partir del cual comienzan a ser importantes los efectos inerciales y gravitatorios de las partículas.

Región 2.- Efecto combinado de la inercia y la gravedad.

La segunda región está representada por las partículas entre 40 y 700 micrones. Se observa que la curva Fully Coupled de la figura 5.4 registra mayor remoción a medida que aumentan los diámetros de las partículas, comparado con la curva en One Way Coupling. El aumento en la remoción en ambos casos se debe a que mientras se incrementa el tamaño de las partículas de arena, el efecto de la gravedad se hace más importante y las partículas tienden a caer por su propio peso. Por otro lado, la posible obstrucción que forma el grupo de partículas afecta en buena proporción al flujo disminuyéndole su capacidad de arrastrar las partículas. Este es el motivo por el cual se nota una amplia diferencia porcentual (Tabla 5.1) entre los valores de remoción de la curva en One Way Coupling y la Fully Coupled, dado que el primero no es capaz de reproducir el efecto de las partículas sobre el flujo.

La máxima diferencia porcentual se da a 100 micrones; punto que se toma como valor referencial a partir del cual comienzan a predominar progresivamente las fuerzas gravitatorias y sobre las fuerzas de inercia sobre las partículas y dejando en

un segundo plano la influencia de la corriente del flujo. Este comportamiento se relaciona estrechamente con los valores obtenidos para el número de Stokes (St), ya que entre 100 y 200 micrones los valores de este número adimensional, indican que $St \gg 1$ por lo que las partículas tienen un tiempo de respuesta muy alto en función al tiempo característico. Es decir, las partículas dejan de percibir una alta influencia por parte del fluido. En las figuras 5.7 a y 5.7 b se evidencian el comportamiento de las partículas de arena para las dos modalidades en estudio (Fully Coupled y One Way Coupling respectivamente). Para partículas de 50 μm se observa que los flujos secundarios a nivel de las zonas bajas es la principal responsable del efecto en la remoción. No obstante, la tendencia que se muestra en el caso Fully Coupled es a que gran parte de las partículas se queden en la zona baja del equipo; a diferencia del caso en One Way Coupling donde las partículas tienen mayor tendencia a subir y salir del dispositivo arrastradas por el crudo.

Otro detalle importante de resaltar es que en la figura 5.7a, las trayectorias de las partículas tienden a irse a las zonas cercanas a la pared. Este fenómeno ocurre porque que los flujos secundarios en la parte baja del dispositivo en lugar de arrastrar las partículas (como ocurre en One Way Coupling, figura 5.7b), las expulsa centrífugamente hacia los extremos haciéndolas girar por la pared hasta depositarlas en el fondo.

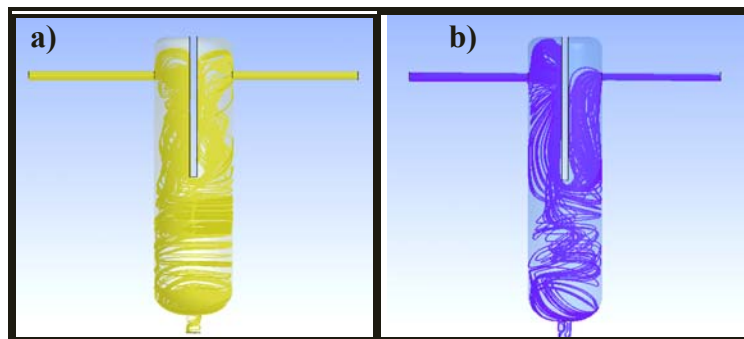


Figura 5.7 Comportamiento de las partículas de 50 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

En el caso de partículas 100 micrones los comportamientos se muestran en las figuras 5.8a y 5.8b. Estas figuras presentan como en los casos anteriores, una importante presencia de vorticidades al bajar por la placa deflectora lo que favorece a la separación de las partículas. Se comienza a manifestar una tendencia de las partículas a irse hacia un lado del dispositivo (lado derecho de las figuras) para luego caer al fondo y depositarse. La razón de este comportamiento se encuentra en que la tendencia natural del flujo, es la de ir de mayor a menor presión. Esto explicaría por qué se dirige hacia el lado derecho, sin embargo, el motivo de la caída hacia el fondo se debe al efecto combinado de la inercia y la gravedad que empiezan a manifestarse por el aumento del tamaño de las partículas. Un comportamiento similar se muestra en las figuras 5.9a y 5.9b para diámetros de partículas de 200 micrones.

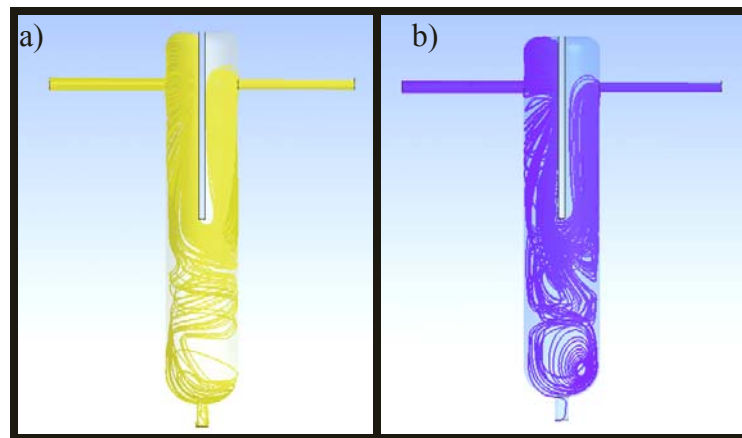


Figura 5.8 Comportamiento de las partículas de 100 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

Resulta conveniente mencionar que además de la interacción entre las partículas con el fluido, también se puede presentar el caso de la interacción entre ellas mismas para la modalidad de “Fully Coupled”. Con base a esto, gran parte de la sedimentación que se muestra, se origina por el empuje entre las partículas, aunado al efecto de la inercia de las partículas y la fuerza de gravedad.

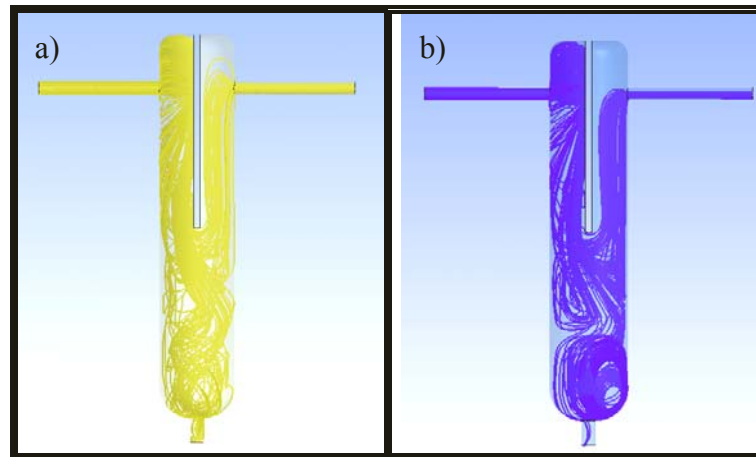


Figura 5.9 Comportamiento de las partículas de 200 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

Para diámetro de 300 micrones se intensifica la tendencia a ir hacia la zona derecha antes de depositarse. Se nota además que las partículas en Fully Coupled (Figura 5.10a) tienen una caída más suave que las de One Way Coupling (Figura 5.10b) que por su parte muestran alta presencia de flujos secundarios. Esto se debe a que las partículas comienzan a tener una inercia lo suficientemente importante como para evitar ser arrastradas con facilidad.

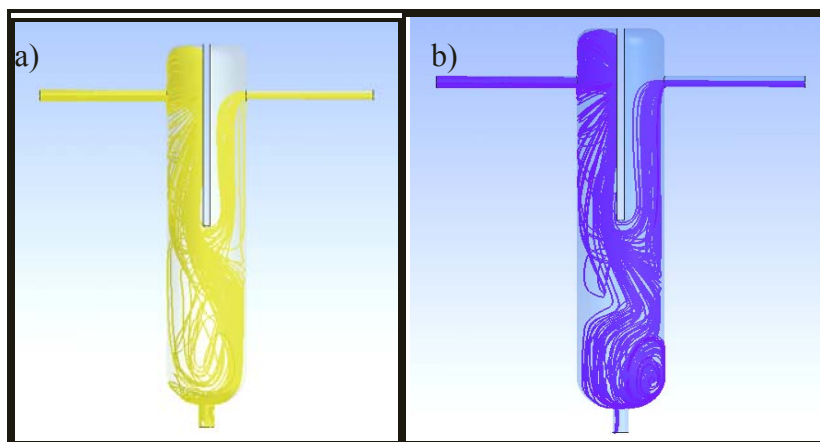


Figura 5.10 Comportamiento de las partículas de 300 micrones en el desarenador a) Fully Coupled b) One Way Coupling

Este fenómeno es similar para partículas de 400 micrones, en donde se evidencia que en Fully Coupled (Figura 5.11a) ya la arena cae por su peso y son muy pocas las partículas que son arrastradas por el flujo. Para el caso de One Way Coupling, se observa que el comportamiento es similar (5.11b). Ya en este punto los valores del Número de Stokes (St) dan referencia a tiempos de respuesta muy grandes lo que da una noción de que las partículas no reaccionan lo suficientemente rápido como para dejarse llevar por la corriente. Esto genera que caigan y se depositen en el fondo.

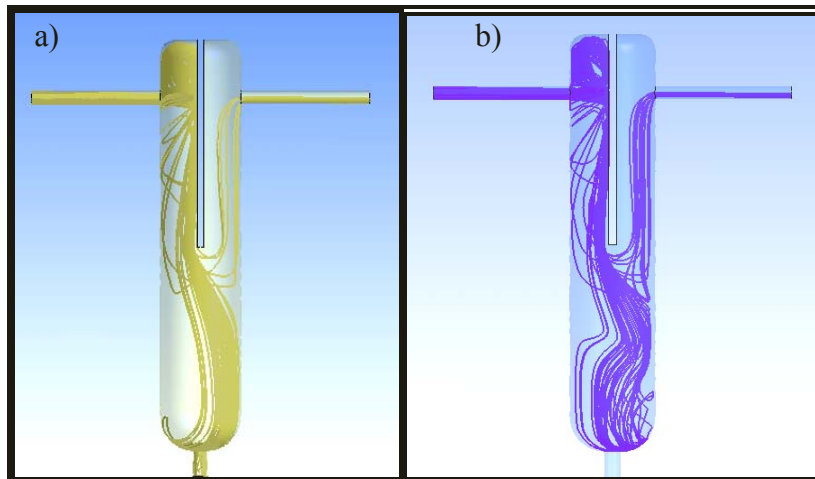


Figura 5.11 Comportamiento de las partículas de 400 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

Región 3.- Predominio de la gravedad

En la tercera zona el fluido pierde su efecto sobre las partículas y estas basan su recorrido en términos de la influencia de la gravedad sobre ellas. Al perder importancia el flujo, tanto para el caso One Way como para el Fully Coupled, el valor de remoción se mantiene constante en 100%. Esto se da a diámetros de partículas mayores a 400 micrones.

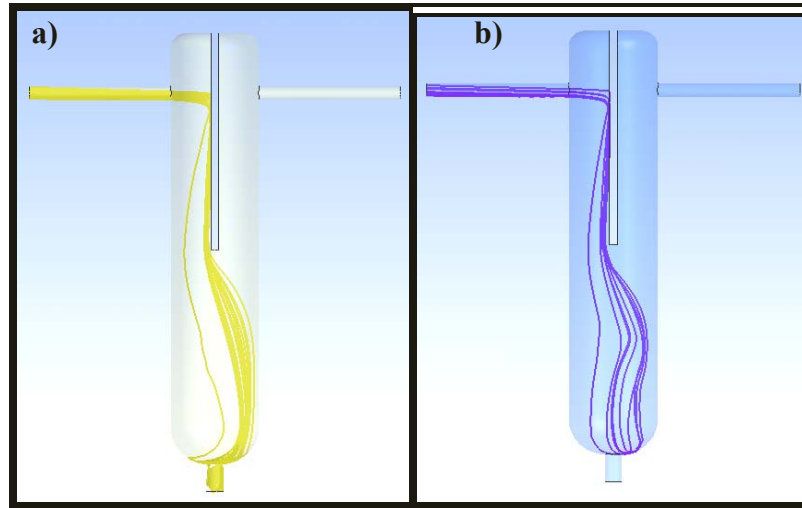


Figura 5.12 Comportamiento de las partículas de 700 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

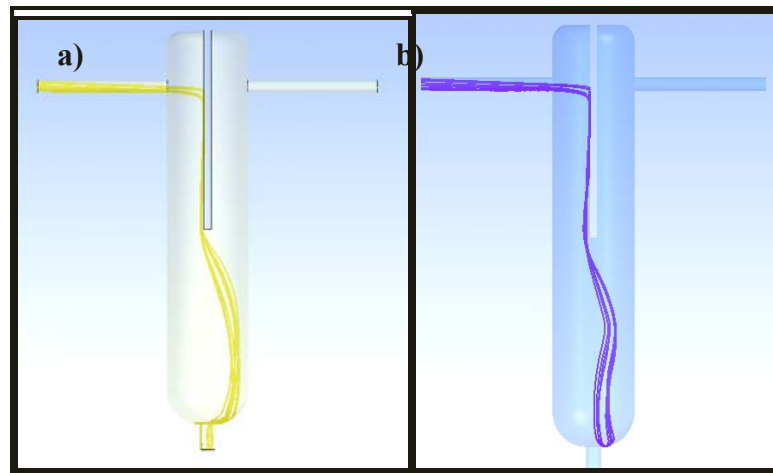


Figura 5.13 Comportamiento de las partículas de 1000 micrones en el desarenador para $\phi=0,001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

En las figuras 5.12a y 5.12b se muestra como las partículas se depositan (tanto en Fully Coupled como en One Way Coupling respectivamente) de una manera semejante. El recorrido es directo y no marcado por la influencia de los flujos secundarios debido a que la masa de la partícula es tal, que su tendencia es a caer.

Para respaldar lo anteriormente planteado, se recurre a los valores de la velocidad adimensional de sedimentación (S_v) para diámetro de 700 y 1000 micrones, los cuales son valores muy altos que implican el hecho de que la velocidad adquirida por términos gravitatorios predomina y genera mayor efecto que la adquirida por causas de la fluidodinámica.

5.2.2 Estudio de la remoción para $\phi=0,0001$

Luego de realizar el estudio para una fracción volumétrica de arena a la entrada 0,001, se orienta ahora el análisis al comportamiento del fluido en presencia de menos cantidad de partículas. Para esto se usó una fracción volumétrica de arena de 0,0001. En la tabla 5.3 se muestran los valores del porcentaje de remoción en función a las dos modalidades de modelado del transporte de partículas (One Way Coupling y Fully Coupled) sabiendo que los valores de densidad de flujo másico a la entrada son constantes y tienen un valor de 0,98308 Kg/m³s.

Tabla 5.3 Resultados de porcentaje de remoción para diferentes tamaños de partículas para una densidad de flujo másico de entrada 0,98308 Kg/m*s en las modalidades de One Way Coupling y Fully Coupled para $\phi=0,0001$

| Diámetro (μm) | One way Coupling | | Fully Coupled | | % Diferencia |
|-------------------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|--------------|
| | DFMS (Kg/m*s) | Remoción % | DFMS (Kg/m*s) | Remoción % | |
| 30 | 0,949 | 3,48 | 0,952 | 3,14 | 10,83 |
| 40 | 0,946 | 3,72 | 0,943 | 4,03 | 7,69 |
| 50 | 0,954 | 2,918 | 0,942 | 4,13 | 29,35 |
| 100 | 0,944 | 3,88 | 0,925 | 5,82 | 33,33 |
| 200 | 0,865 | 11,99 | 0,787 | 19,98 | 39,99 |
| 300 | 0,446 | 54,54 | 0,357 | 63,63 | 14,29 |
| 400 | 0,163 | 83,33 | 0,00 | 100,00 | 16,67 |
| 700 | 0,000 | 100,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 |
| 1000 | 0,000 | 100,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 |

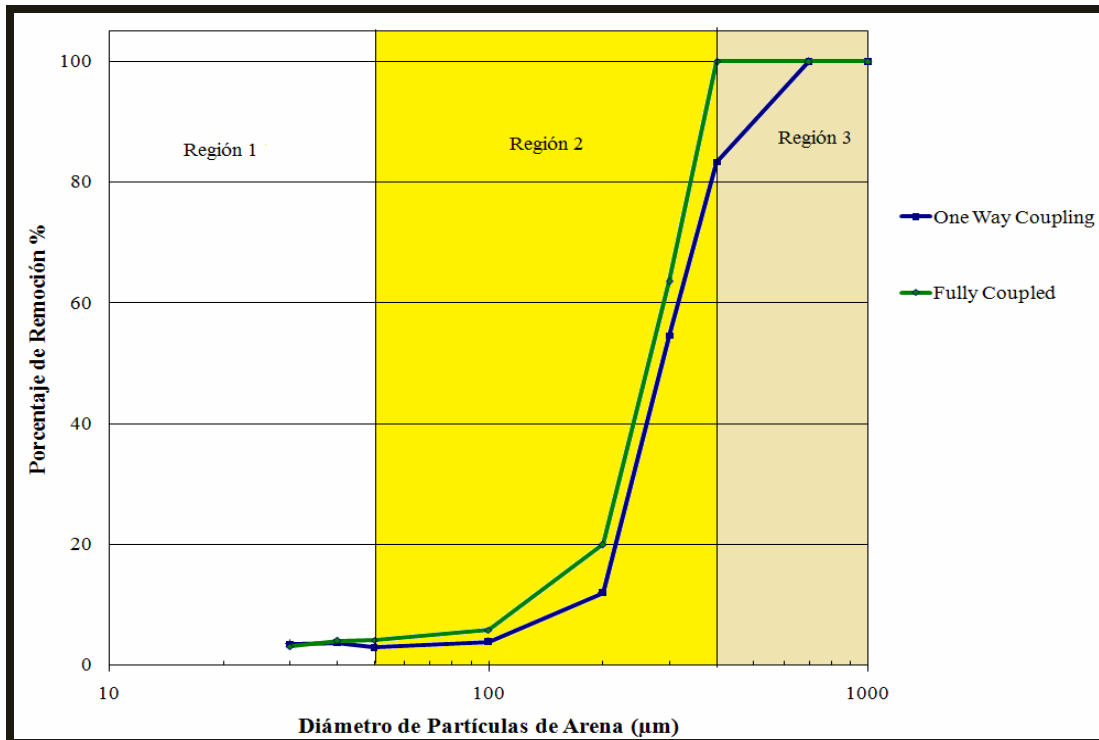


Figura 5.14 Gráfica comparativa del porcentaje de remoción para diversos tamaños de partículas en One Way Coupling y Fully Coupled para $\phi=0,0001$

A diferencia de la gráfica que muestra, la figura 5.4 para el comportamiento de la remoción para $\phi=0,001$, las diferencias aquí son menos marcadas y tienen un desenvolvimiento similar tanto en One Way como en Fully Coupled. Esto tiene su explicación en que, al haber menos números de partículas, el efecto de obstrucción mencionado anteriormente se da en menor cuantía. Además la interacción entre partículas es menor por lo que su influencia sobre el flujo disminuye. A pesar de esto, el patrón de comportamiento se mantiene con respecto a lo planteado en la sección 5.2.1, es decir, la curva en Fully Coupled tiene un crecimiento un poco más pronunciado que el caso One Way originando las 3 zonas de comportamiento: Predominio del flujo, efecto combinado entre la inercia y la gravedad, y la zona de predominio de la gravedad. A continuación se describen, las distintas zonas de comportamiento del flujo y sus características más resaltantes.

Región 1.- Predominio del flujo

Al Igual que para una fracción volumétrica de $\phi=0,001$, la primera de estas zonas se caracteriza por la gran influencia de las corrientes de crudo sobre las partículas. Se evidencia que para los casos de 30, 40 y 50micrones (figuras 5.15 a, 5.15b, 5.16 a, 5.16b, 5.17a y 5.17 b) que la tendencia es a seguir al flujo

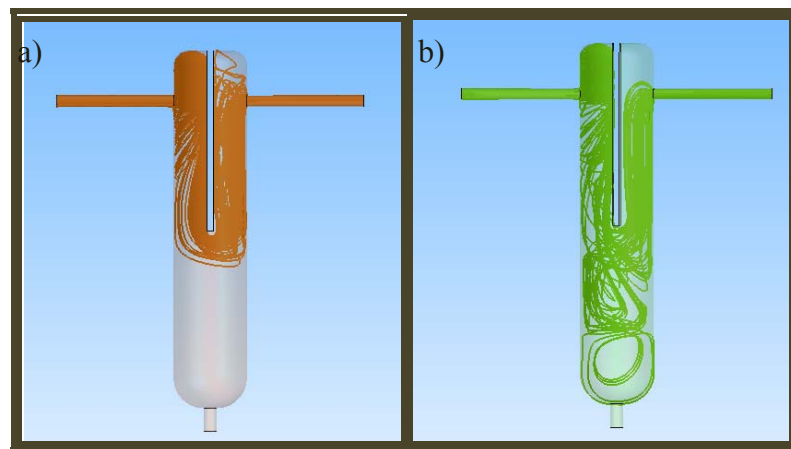


Figura 5.15 Comportamiento de las partículas de 30 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

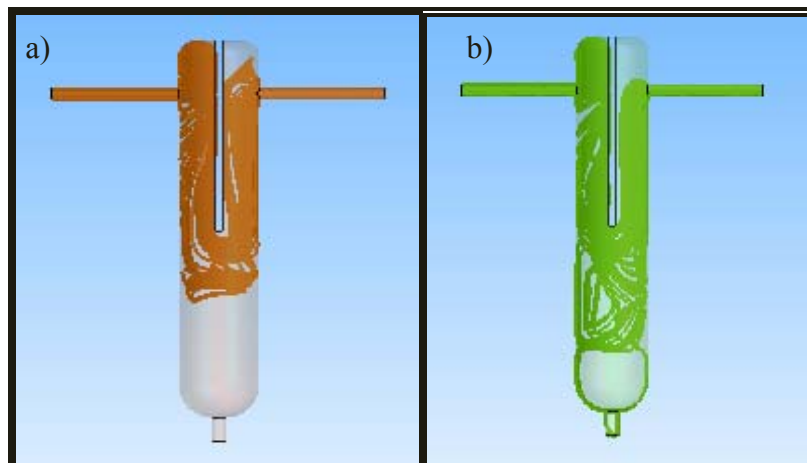


Figura 5.16 Comportamiento de las partículas de 40 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

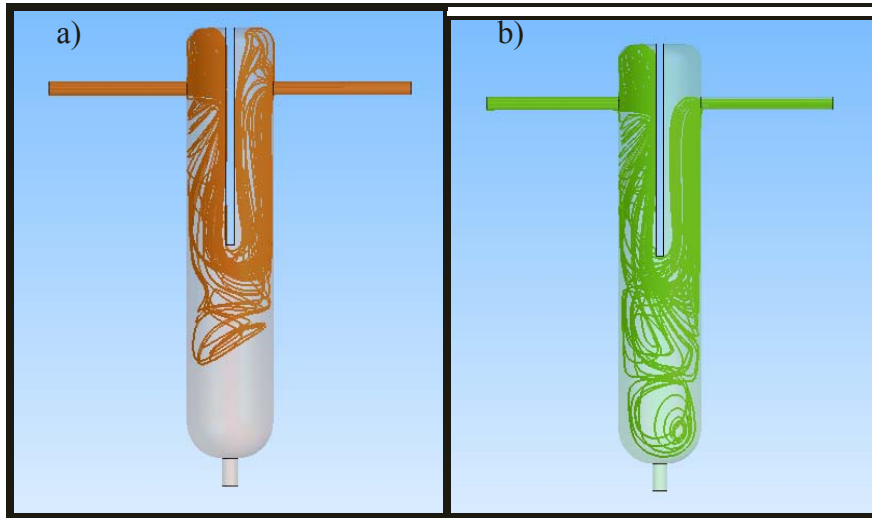


Figura 5.17 Comportamiento de las partículas de 50 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

A diferencia del caso de $\phi=0,001$, esta etapa de predominio del flujo se extiende de mayor tamaño, esto se debe al hecho de que al haber menos cantidad de partículas interactuando en el volumen de control, la influencia de las mismas sobre el fluido y sobre otras partículas se hace mucho menor, por lo que tienden a mantener un comportamiento mucho más parecido entre Fully Coupled y One Way Coupling como se observa en la gráfica mostrada en la Figura 5.14

Región 2.- Efecto combinado de inercia y gravedad.

Aquí se reproduce un comportamiento similar que en el caso con mayor fracción volumétrica. En este caso la remoción se da en menor proporción, en gran parte porque hay menos interacción de las partículas, pero los efectos inerciales y gravitatorios se mantienen, a tal punto que las trayectorias tomadas por las partículas mantienen las mismas tendencias tanto para One Way Coupling como en Fully Coupled. A continuación se muestran las trayectorias y el comportamiento de la partículas de 100, 200 y 300 μm .

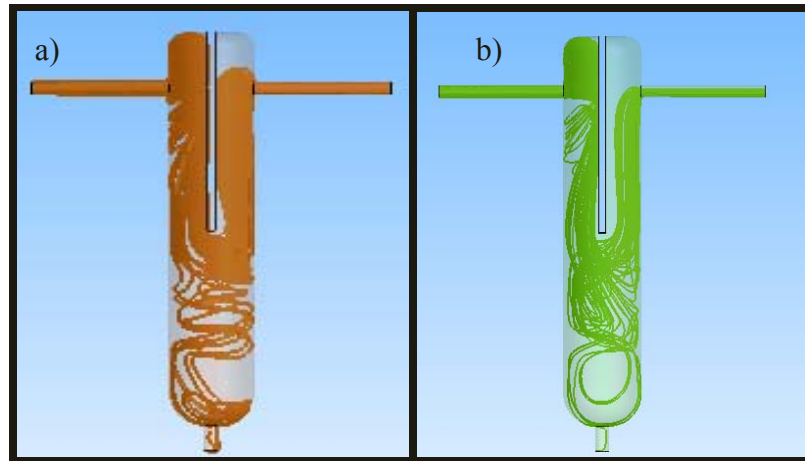


Figura 5.18 Comportamiento de las partículas de 100 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

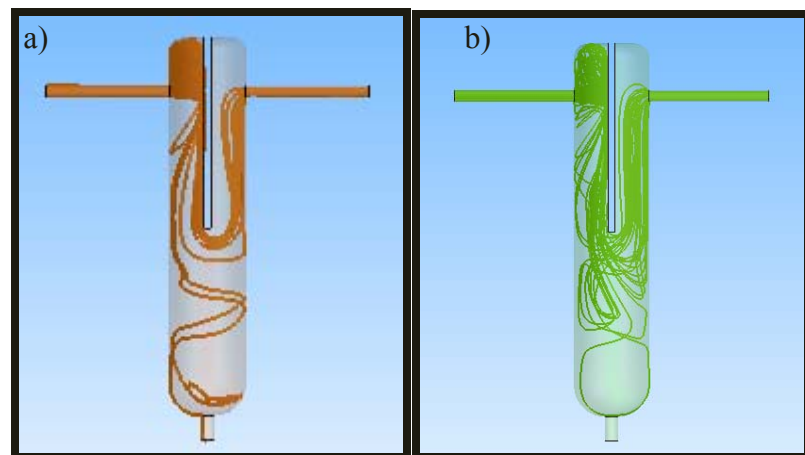


Figura 5.19 Comportamiento de las partículas de 200 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

Tanto para 100 μm como para 200 μm (Figuras 5.18 y 5.19 respectivamente) se evidencia que las partículas van cayendo en una trayectoria cercana a la pared en Fully Coupled, fenómeno que se planteó en el caso de mayor fracción volumétrica y que es la primera señal de que las partículas comienzan a tener inercia suficiente para resistirse al movimiento.

En el caso de One Way Coupling, siguen predominando los flujos secundarios en el fondo del recipiente y son quienes afectan en mayor proporción al movimiento de las partículas.

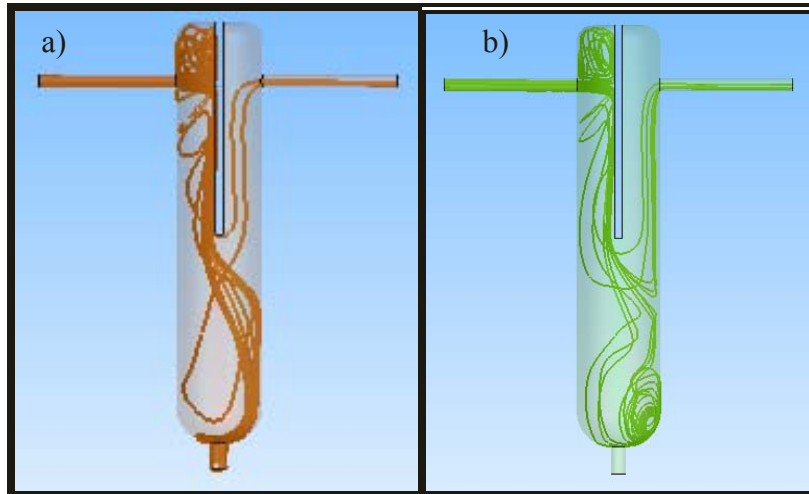


Figura 5.20 Comportamiento de las partículas de 300 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

En el caso de 300 μm ya el efecto de la gravedad comienza a verse fuertemente marcado (Figura 5.20a y 5.20b), y se presenta la tendencia a depositarse moviéndose hacia la zona derecha del dispositivo (como fue explicado en la sección 5.2.1) en ambas modalidades.

Región 3.- Predominio de la gravedad

Esta zona indica que ya el fluido pierde su efecto sobre las partículas y que ellas comienzan a depender únicamente de la gravedad, la cual dirige su trayectoria hasta el fondo hasta depositarse. Al perder importancia el flujo, tanto para el caso One Way como para el Fully Coupled, la remoción es total. En las figuras 5.21, 5.22 y 5.23 se observa que se da una caída libre dando a entender lo explicado anteriormente.

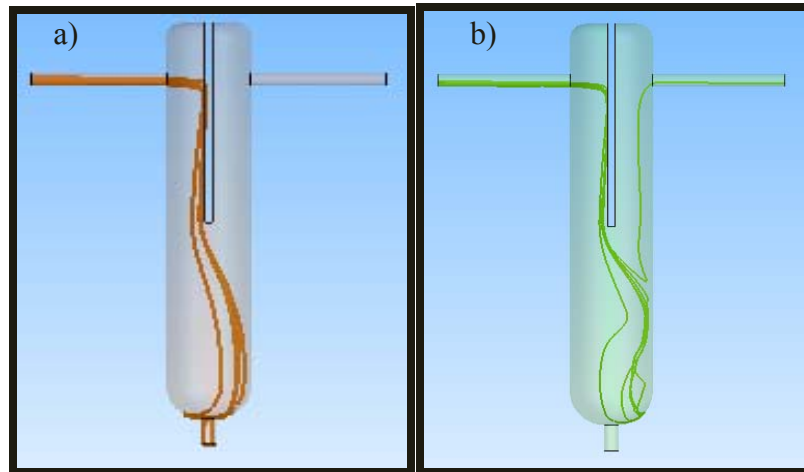


Figura 5.21 Comportamiento de las partículas de 400 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

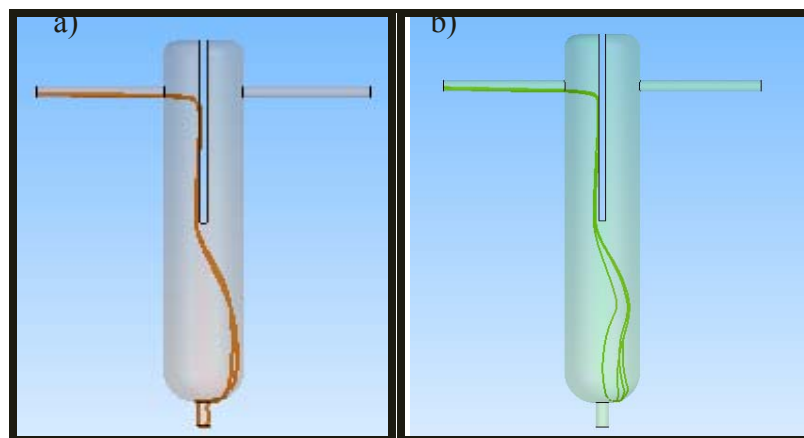


Figura 5.22 Comportamiento de las partículas de 700 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

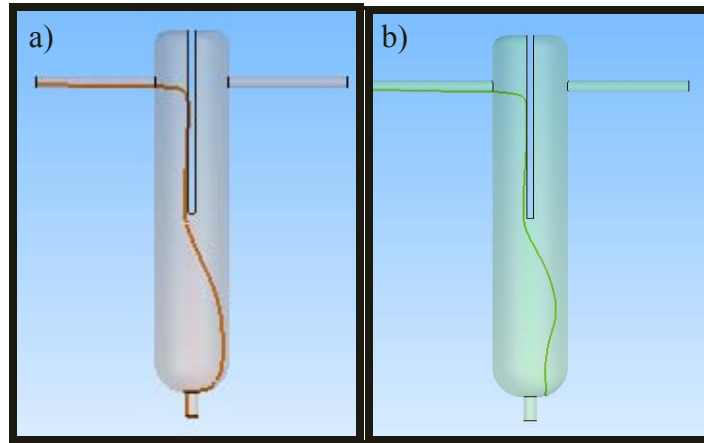


Figura 5.23 Comportamiento de las partículas de 1000 micrones en el desarenador para $\phi=0,0001$ a) Fully Coupled b) One Way Coupling

5.3 Efecto de la variación de la fracción volúmica de partículas a la entrada

El efecto de la cantidad de partículas sobre la remoción es otro aspecto fundamental al cual se orienta este estudio. Cuando se maneja este concepto en corridas One Way Coupling, el efecto es despreciable según demostró Andueza^[1] en su trabajo de investigación adaptado al dispositivo en cuestión. Sin embargo, en términos de partículas acopladas completamente con el flujo de fluido el efecto debe ser distinto.

Hasta este punto se ha trabajado con los valores de remoción obtenidos en la sección 5.2 para fracciones volúmicas $\phi=0,0001$ y $\phi=0,001$. Para ampliar el rango en estudio, se realizaron simulaciones para una fracción volúmica $\phi=0,005$ y así analizar en un espectro mayor la sensibilidad que presenta la remoción ante un aumento del número de partículas.

En la tabla 5.4 se muestran los valores obtenidos para la remoción con una fracción volúmica de partículas de $\phi=0,005$. Las simulaciones se realizaron para

100 μm , 200 μm , 300 μm y 400 μm debido a que el costo computacional de para altas fracciones volumétricas es muy alto. No obstante, estos valores referenciales, permiten marcar una tendencia como se muestra en la gráfica comparativa de la figura 5.24

Tabla 5.4 Porcentaje de remoción y características físicas de las partículas para una fracción volumétrica de 0,005 y un flujo másico de 0,396 (Kg/s) y una densidad de flujo másico a la entrada de 49,15 (Kg/s. m²)

| Diámetro (μm) | 100 | 200 | 300 | 400 |
|-----------------------------------|------------|-----------|-------------|------------|
| Área (m ²) | 7,8525E-09 | 3,141E-08 | 7,06725E-08 | 1,2564E-07 |
| N° Part | 5162 | 1290 | 573 | 322 |
| DFM Salida(Kg/s. m ²) | 17,70 | 11,50 | 0,51 | 0,41 |
| % Remoción | 63,98 | 76,58 | 98,95 | 99,15 |

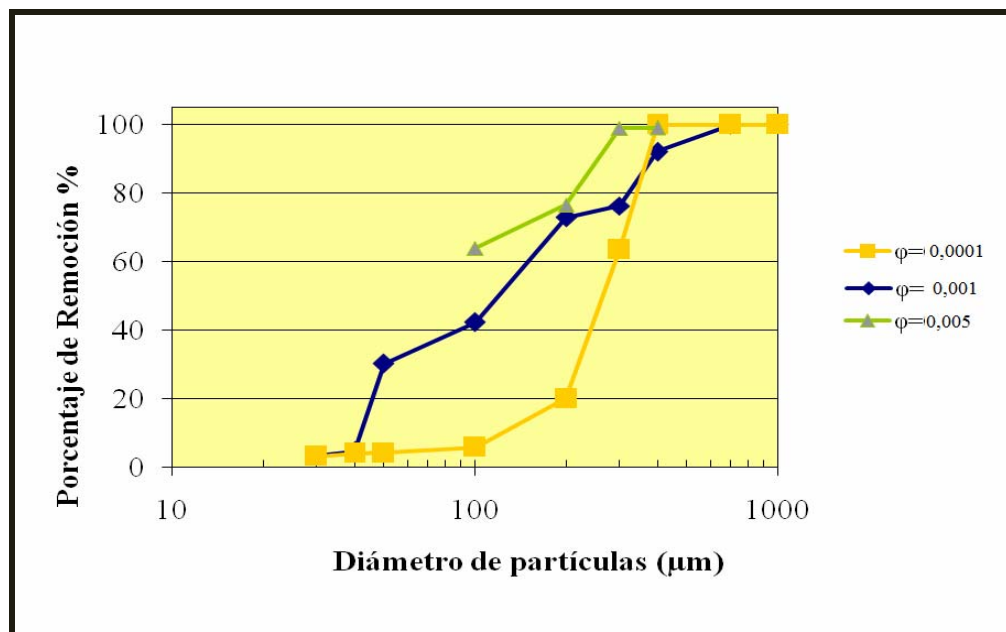


Figura 5.24 Gráfica de porcentajes de remoción para diferentes tamaños de partículas y fracciones volumétricas

La gráfica que se muestra en la figura 5.24 es la representación de cómo varía la remoción en función a los cambios en la fracción volumétrica. Inicialmente, se trabajaron con fracciones volumétricas de 0,001 y 0,0001 en base a las cuales se estudió el efecto de remoción en la sección 5.2. El comportamiento de estas curvas refleja un descenso en la remoción de las partículas a medida que se disminuye la fracción volumétrica de las mismas.

Analizando de manera detallada cada curva, se observa que para la menor fracción volumétrica ($\phi=0,0001$) las remociones son relativamente bajas en función a las demás curvas. La razón de este comportamiento radica en que mientras menor sea el número de partículas, también será menor la interacción de ellas con el flujo y con otras partículas, generando que el predominio del flujo sea prolongado. Se observa además que ya para $400\mu\text{m}$, la cantidad de partículas es tan pequeña y tienen tal peso que actúa predominantemente la gravedad, causando que la remoción sea total.

Para ($\phi=0,001$) el comportamiento de la curva se mantiene creciente pero los valores de remoción son notablemente mayores que en el caso anterior. Esto en gran medida está justificado, en el hecho de que al haber más partículas hay mayor oportunidad de que interactúen y choquen. Este choque trae consigo una pérdida en la cantidad de movimiento que permite que las partículas tengan mayor independencia en relación al flujo.

Ya para el caso de mayor fracción volumétrica ($\phi=0,005$), las remociones se presentan considerablemente mayores que en los casos anteriores. Esto reafirma lo anteriormente dicho del efecto que se da entre las partículas que además de choque, en este caso también genera una suerte de “empuje” a causa de la obstrucción que ellas mismas se causan entre sí.

En los tres casos se puede observar que a medida que aumenta la fracción volumétrica, los diámetros donde se considera que el S_v es crítico, se hace menor, así como el punto correspondiente al St crítico se prolonga. Este fenómeno se justifica tomando en cuenta que la velocidad de las partículas se hace menor a medida que la cantidad de arena se incrementa; por dicho motivo el comportamiento característico que se muestra cuando $S_v \gg 1$ poco a poco se hace más cercano a la unidad. El comportamiento del St , se fundamenta en que mientras la cantidad de partículas es menor, éstas mantendrán una tendencia a seguir mejor al flujo.

5.4 Caída de Presión

Otro aspecto importante para el estudio es la caída de presión. Si bien es cierto que a nivel de One Way Coupling la variación de la presión es despreciable en relación al tamaño de la partícula debido a que estas no afectan el flujo, para el caso de Fully Coupled la situación se presenta diferente.

En la tabla 5.5 se describen las caídas de presión para la modalidad “Fully Coupled”. Además se muestra la constante de pérdidas de presión como accesorio del Separador calculada de la siguiente manera:

$$K = \Delta P * 2g / (V_{ent})^2 * \rho * g \quad (5.16)$$

Vale destacar que para One Way Coupling la caída de presión es constante en un valor aproximado de 6721,9 pa, generando una constante $K = 1,264$

Tabla 5.5 Valores de caída de presión y constante K de pérdidas secundarias para distintos tamaños de partículas para una fracción volumétrica de arena de $\varphi=0,001$ en Fully Coupled

| Diámetro (μm) | ΔP (pa) | K |
|----------------------------|-----------------|-------|
| 1000 | 6731,8 | 1,266 |
| 700 | 6728,0 | 1,265 |
| 400 | 6735,3 | 1,266 |
| 300 | 6732,1 | 1,266 |
| 200 | 6737,6 | 1,267 |
| 100 | 6735,2 | 1,266 |
| 50 | 6745,9 | 1,268 |
| 40 | 6750,4 | 1,269 |
| 30 | 6753,0 | 1,270 |

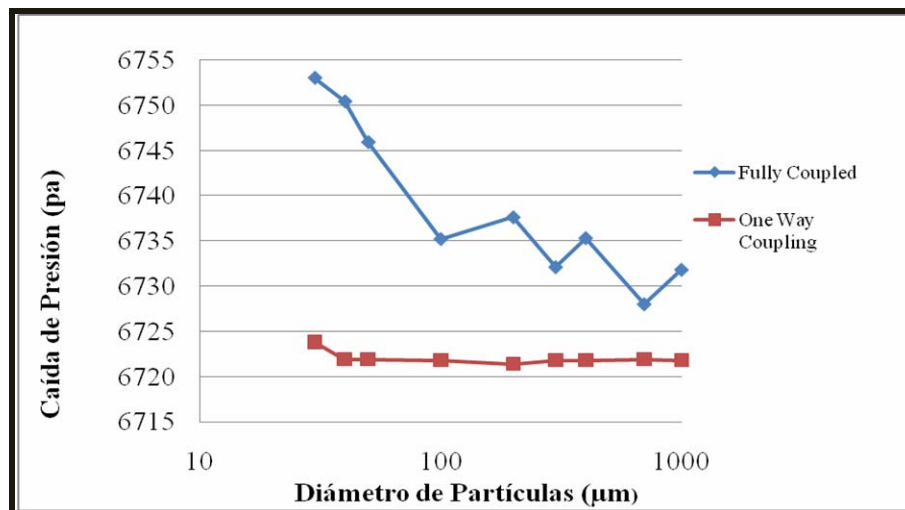


Figura 5.25 Gráfica comparativa de caída de presión para diversos tamaños de partículas en One Way Coupling y Fully Coupled para una fracción volumétrica $\varphi=0,001$

En la figura 5.25 se muestra que la caída de presión en la modalidad Fully Coupled es mayor que en One Way Coupling. La explicación para este comportamiento está en el hecho de que ante una interacción entre el fluido y las partículas, el efecto de fricción con las partículas genera una pérdida de energía.

El comportamiento de la curva para las simulaciones en One Way debe arrojar caídas de presiones iguales como se observa en la figura 5.25, esto es porque al no haber interacción entre el fluido y las partículas, el flujo es básicamente monofásico, por lo que la variación debe ser nula. La tendencia que muestra la curva en Fully Coupled es a descender a medida que aumenta el tamaño de las partículas. Es importante destacar que dado que la fracción volumétrica se mantuvo constante, el número de partículas disminuye al aumentar el diámetro de ellas. Así que la caída de presión es menor para menor cantidad de partículas pasando en el recipiente.

Aunado lo mencionado anteriormente las partículas grandes tienden a depositarse en el fondo por lo que mayor parte del crudo fluirá sin partículas. En la tabla 5.6 se muestran los valores de caída de presión, siendo este caso para una fracción volumétrica menor, cuyo valor fue de $\phi=0,0001$, además de los respectivos valores de la constante (K) para pérdidas secundarias.

Es válido mencionar que en este caso también la caída de presión se mantiene constante en One Way Coupling en un valor aproximado de 6716,6 pa que genera un $K= 1,263$

Tabla 5.6 Valores de presión a la entrada y salida del desarenador y caída de presión para distintos tamaños de partículas para una fracción Volumétrica de $\varphi=0,0001$

| Diámetro (μm) | ÄP (pa) | K |
|----------------------------|---------|-------|
| 1000 | 6717,4 | 1,263 |
| 700 | 6717,3 | 1,263 |
| 400 | 6717,8 | 1,263 |
| 300 | 6718,7 | 1,263 |
| 200 | 6720,3 | 1,263 |
| 100 | 6722,2 | 1,264 |
| 50 | 6723,1 | 1,264 |
| 40 | 6722,5 | 1,264 |
| 30 | 6725,1 | 1,264 |

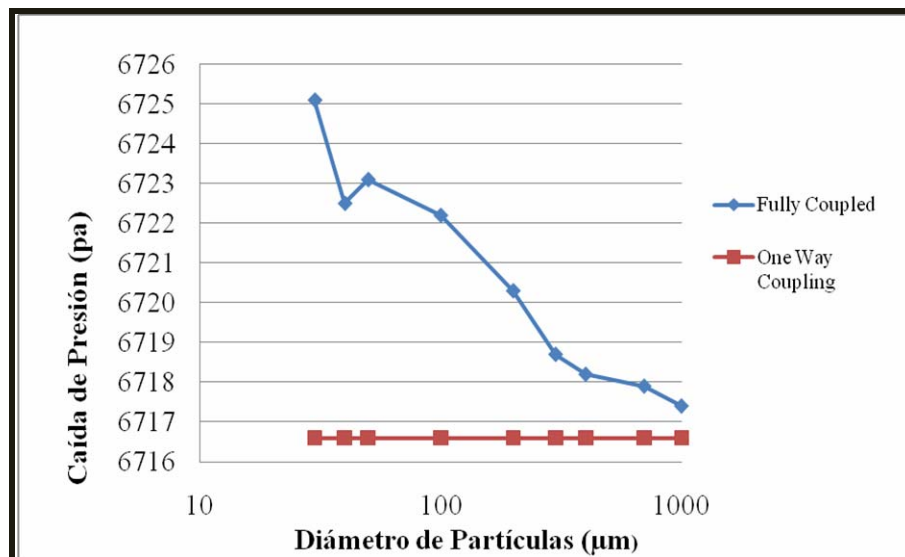


Figura 5.26 Gráfica comparativa de caída de presión para diversos tamaños de partículas en One Way Coupling y Fully Coupled para una fracción volumétrica $\varphi=0,0001$

En la figura 5.26 se observa que el comportamiento es similar al caso de $\phi=0,001$. Sin embargo, los valores de K para un $\phi=0,0001$ muestra una variación más pequeña en sus caídas de presión y esto se debe a que en presencia de menor número de partículas (a causa de la reducción de la fracción volumétrica) el efecto de obstrucción que realizan las partículas al fluido se hace menor. Esto se observa a tal punto que las curvas One Way Coupling y Fully Coupled tienen valores muy cercanos entre sí.

En lo referente a las constantes K para el cálculo de pérdidas secundarias, los valores reflejados en las tablas 5.5 y 5.6, se mantuvieron constantes al variar los diámetros de partículas en el caso de One Way, lo que se explica en el hecho de que la variación de presión se mantuvo prácticamente invariable en este caso. A nivel de Fully Coupled, la variación siguió la tendencia que se esperaba en base a sus caídas de presión. Es importante mencionar, que a pesar de que variaron, no lo hicieron en una alta proporción.

Los valores de K en ambos casos son similares y se muestran entre los rangos típicos de otros accesorios. Si se tomara el mayor valor de K como referencia (que generaría la mayor caída de presión) en pro de sobre diseñar, se estaría hablando de un coeficiente de 1,27. Este valor sería el equivalente al K que mostraría una válvula de globo de 4" o un filtro de rejilla de 2" según la normas PDVSA.^[16]

Para complementar el estudio de la caída de presión en el caso de Fully Coupled, se realizaron una serie de simulaciones manteniendo un número de partículas constante de 100 unidades y tomando tamaños de 30 μm , 50 μm , 100 μm y 200 μm . Esto para determinar la influencia del tamaño de las partículas en la caída de presión. La selección de los tamaños de partícula fue realizada arbitrariamente.

La figura 5.27 muestra la gráfica de tendencia en base a los resultados obtenidos para los diferentes diámetros de partícula utilizados para este estudio.

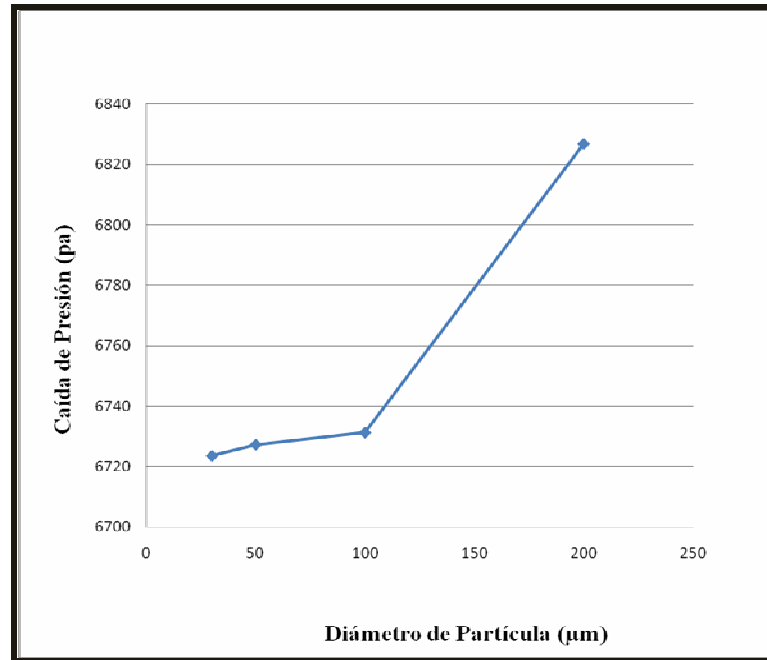


Figura 5.27 Gráfica de caída de presión en función al diámetro para 100 partículas

En la figura 5.27 se muestra el comportamiento creciente de la caída de presión a medida que se aumenta el diámetro de las partículas. Este comportamiento tiene su explicación en el hecho de que a mayor tamaño de partícula mayor es su influencia sobre el fluido y sobre las otras partículas, causando que el efecto de obstrucción y la pérdida de energía sean más pronunciados.

5.5 Comparación con trabajos anteriores

Este trabajo tiene su origen en la investigación realizada por Andueza ^[1] en 2006 que llevaba por nombre: “Estudio del comportamiento de un flujo multifásico

en equipos de control de sólidos a nivel de cabezal de los pozos que fluyen a COA Estación (NMEF-4), Distrito Norte”. Por tal motivo representa el principal punto de comparación del presente estudio.

A continuación en la tabla 5.7 se plantean en un cuadro comparativo las principales características de ambos trabajos.

Tabla 5.7 Cuadro comparativo entre la investigación realizada por Andueza (2006) ^[1] y el presente estudio.

| Estudio de desarenadores de tipo placa impacto de Andueza-2006 | Presente Estudio de desarenadores de tipo placa impacto |
|--|---|
| La sensibilidad de malla se realizó en base a velocidad | El estudio de sensibilidad de malla se realizó en base a velocidad y porcentaje de remoción. |
| Las simulaciones se hicieron tomando un modelo de acoplamiento unidireccional “One Way Coupling” que no toma en cuenta la interacción Partícula-fluido | Las simulaciones se realizaron usando un modelo de acoplamiento completo o “Fully Coupled” para considerar la interacción Partícula- fluido y ver su influencia en el comportamiento. |
| Las caídas de presiones eran constantes para todos los tipos de tamaños de partícula puesto a que el modelo usado se basaba en una corrida monofásica | Las caídas de presión variaron considerando que el efecto del choque entre las partículas generaba mayor fricción y causaba una pérdida en la cantidad de movimiento. |
| El modelo se trabajo con una fracción volumétrica constante de 0,001 | Se manejaron varias fracciones volumétricas para determinar la sensibilidad del proceso a las variaciones del número de partículas |
| Se usaron 9 tamaños de partículas 30, 40, 50,100, 200, 300, 400, 700, 1000 micrones | Se usaron 9 tamaños de partículas 30, 40, 50,100, 200, 300, 400, 700, 1000 micrones |
| Se planteó la existencia de 4 zonas de comportamiento de remoción | Se determinó la presencia de 3 zonas de comportamiento de la remoción. |
| Se planteó el estudio del número de St y Sv en base a datos geométricos del modelo a partir de los cuales se determinó el tiempo característico del fluido (T_k) | El estudio del St y el Sv se realizó tomando como punto de partida la teoría del “Remolino de Kolmogorov” y en base al cual se obtuvo el (T_k) |
| El estudio se enfocó hacia el estudio de 4 geometrías con variaciones en la configuración interna del dispositivo. | Se manejó un modelo físico estándar sin variaciones en la configuración interna. |
| Para partículas de 30, 40, 50 micrones se obtuvieron remociones, alrededor de 45 % | Para partículas de 30, 40, 50 micrones se obtuvieron remociones, alrededor de 5 % |
| La remoción se presentó fluctuante a medida que se aumentaban los diámetros de las partículas | Se evidenció que a medida que aumentaban los diámetros de partículas, las remociones aumentaban |
| La variación de la fracción volumétrica no arrojó cambios considerables en la caída de presión y en la remoción. | El cambio de la fracción volumétrica es determinante en la caída de presión y en el porcentaje de remoción. |

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

1. La caída de presión en la modalidad de “Fully Coupled” es mayor que las de “One Way Coupling” por el efecto de interacción de las partículas.
2. Se definieron tres regiones de comportamiento de remoción en base a las partículas:
 - 2.1.- En la primera región las partículas se dejan llevar por el flujo. La remoción depende directamente de la formación de flujos secundarios. Se caracteriza por la presencia de $St < 1$.
 - 2.2.- La segunda región se caracteriza por un efecto combinado de inercia y efecto gravitatorio sobre las partículas. La remoción depende de la formación de flujos secundarios y del efecto de la fuerza de gravedad.
 - 2.3.- En la tercera región de comportamiento predomina el efecto de la gravedad sobre las partículas. En este caso la remoción es alta a causa de que las partículas tienden a caer sin verse afectadas por el flujo.
3. El St crítico inferior para una fracción volumétrica $\phi = 0,001$ se presentó para partículas de $40\mu\text{m}$. Por otro lado, para $\phi = 0,0001$ se extendió el rango hasta partículas de $50\mu\text{m}$.

4. A mayor fracción volumétrica el S_v crítico se presenta en partículas de menor diámetro debido a que en presencia de más partículas la velocidad de las mismas disminuye.
5. El modelo Fully Coupled representa la mejor opción para este tipo de dispositivos. La aproximación que ofrece el modelo One Way Coupling para las regiones de “predominio del flujo” y “predominio de la gravedad”
6. La remoción de las partículas se incrementa a medida que aumenta sus dimensiones debido a que a mayor masa las partículas tienen más inercia al movimiento del fluido y mayor es la influencia de la gravedad.
7. La remoción es sensible a cambios de la fracción volumétrica de arena a la entrada. Para determinado diámetro el aumento del número de partículas genera un incremento en el porcentaje de remoción.
8. A mayor fracción volumétrica la caída de presión se incrementa a causa de que aumenta la interacción entre las partículas y el fluido y entre sí mismas, generando más pérdidas de energía.
9. El valor de la constante K para pérdidas secundarias estuvo alrededor de 1,270.

6.2. Recomendaciones

1. Simular modelos con diversas geometrías internas y externas tomando como modalidad de agrupamiento de partículas la “Fully Coupled”.
2. Estudiar el efecto de la presencia de otras fases como gas, agua u otro tipo de sedimentos en dichos dispositivo.
3. Hacer estudios con equipos similares que trabajen a diferentes condiciones y que manejen diferentes tamaños de partículas.
4. Determinar si existen otros modelos de turbulencia que describan mejor el proceso.
5. Realizar simulaciones donde se considere las rupturas de las partículas a causa del choque entre ellas.
6. Realizar simulaciones donde se utilicen modelos que permita inferir el desgaste por efecto de choque de la partícula.
7. Simular con diferentes flujos máxicos de crudo a la entrada y distintas densidades de partículas y así verificar si afectan los valores de St crítico y Sv crítico

BIBLIOGRAFÍA

1. Andueza, G. **“Estudio del comportamiento de un flujo multifásico en equipos de control de sólidos a nivel de cabezal de los pozos que fluyen a COA Estación (NMEF-4), Distrito Norte”**. Trabajo de Grado UDO, Departamento de Mecánica, Puerto La Cruz, (2006).
2. Gómez, L. **“Diseño Conceptual para Prueba Piloto Separador Arena en Cabezal de Pozo Estación de Flujo Amana”**. Informe Ejecutivo Preliminar, Punta de Mata, (2005).
3. Rodríguez, J **“Estudio de del comportamiento del flujo multifásico en un separador vertical de gas-líquido a través de una simulación, utilizando la técnica de dinámica de fluidos computacional (CFD)”** Trabajo de Grado UDO, Departamento de Mecánica, Puerto la Cruz, (2009).
4. Bruzual, G **“Caracterización Física de Yacimientos”**- Texto Departamento de Petróleo, Universidad de Oriente- Puerto la Cruz, (2007).
5. Brill, G. Gregory. BHR group Conf. Series. Publ. No. 31., **“Prediction Of Sand Erosion In Process And Pipe Components”**. Det Norske Veritas, Veritsaveien 1, N-1322 Høvik, NORWAY Published in: Proc. 1 st North American Conference on Multiphase Technology. Banff, Canada, (1998).
6. Fariña, J, **“Guía de Producción de hidrocarburos”**- Puerto la Cruz, (2004).
7. PDVSA Norma MDP-03-S-03. **“Manual de diseño de proceso, separadores líquido-vapor”**. Venezuela. (1995).
8. Rodríguez, Y. **“Ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos”**, Universidad de la Habana, Facultad de Matemática y Computación, La Habana. (2006)
9. King, R.P. **Introduction to Practical Fluid Flow**, Primera Edición, Editorial Buttlerworth Heinemann, (2002).

10. ANSYS Inc, “**ANSYS CFX, Computational Fluids Dynamics -Release 10.0:- Intro- CFDConcepts**”, (2005).
11. ANSYS Inc, “**ANSYS CFX, Release 10.0: Particle Transport modeling**”, (2005).
12. ANSYS Inc , “**CFX 12.0 Introductory Training**”. Primera Edición Ansys, Inc. EE.UU. (2008).
13. Gómez V., “**Análisis Nodal**”, Instituto de Investigaciones Petroleras, INPELUZ, Maracaibo, Venezuela. (1990).
14. White, F. **Fluids Mechanics**, Quinta Edición. Editorial McGraw-Hill, Estados Unidos, (2002).
15. FIDAP 8 -“**Advanced Course in turbulence**”- Course Notes- Fluent- Abril (1999)
16. Jiménez, E., “**Cálculo Hidráulico en Tuberías**”- PDVSA-Manual de ingeniería de diseño Volumen 13-III-(1994).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

| | |
|------------------|--|
| TÍTULO | “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO CRUDO-ARENA EN DISPOSITIVOS DE CONTROL DE SÓLIDOS DE TIPO PLACA IMPACTO” |
| SUBTÍTULO | |

AUTOR (ES):

| APELLIDOS Y NOMBRES | CÓDIGO CVLAC / E MAIL |
|--|---|
| Barrueta Brito, Jhonattan Alejandro | CVLAC: 19.089.131. E MAIL: Jhonattan_alejandro@hotmail.com |
| | CVLAC: E MAIL: |

PALABRAS O FRASES CLAVES:

Desarenador de placa impacto

Computational Fluid Dynamics (CFD)

Control de sólidos

Crudo-Arena

Porcentaje de remoción

Acoplamiento completo (Fully Coupled)

Acoplamiento unidireccional (One Way Coupling)

Método lagrangiano

Número de Stokes

Número Adimensional de velocidad de sedimentación

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

| ÀREA | SUBÀREA |
|---------------------------------|---------------------|
| Ingeniería y ciencias aplicadas | Ingeniería Mecánica |
| | |
| | |
| | |

RESUMEN (ABSTRACT):

En la presente investigación se muestra el estudio del comportamiento de un flujo bifásico de crudo y arena que pasa por un equipo de control de sólidos de tipo placa impacto usando como herramienta un software comercial de dinámica de los fluidos computacional. El modelo corresponde al mismo prototipo previamente estudiado por Andueza (2006)^{III}. Para estudiar la interacción de la arena sobre el crudo, se manejaron 9 tamaños de partículas utilizando dos modelos de simulación: el modelo de acoplamiento unidireccional (One Way Coupling; i.e, sin influencia de las partículas sobre el fluido) y el modelo de acoplamiento completo (Fully Coupled; i.e, con influencia de las partículas sobre el fluido). La intención de usar ambos modelos es comparar los resultados de porcentaje de remoción de arena y caída de presión entre ellos. Así mismo se estudió el efecto de la fracción volumétrica de arena sobre la caída de presión y la remoción. Se observaron tres (3) regiones de comportamiento que adoptaban las partículas según su tamaño. Además se marcó una tendencia de aumento de la remoción y la caída de presión mientras se incrementaba la fracción volumétrica de arena, cuando se trabaja en la modalidad de “Fully Coupled”.

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

| APELLIDOS Y NOMBRES | ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL | | | | |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------|-----------|-------------------|
| | ROL | CA | AS - X | TU | JU |
| Ayala, Orlando | CVLAC: | 11.420.758 | | | |
| | E_MAIL | Omayalah.udo@gmail.com | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | ROL | CA | AS | TU | JU - X |
| Da Silva, Carlos | CVLAC: | 15.279.489 | | | |
| | E_MAIL | Dasilva.leal@gmail.com | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | ROL | CA | AS | TU | JU - X |
| Bittar, Simón | CVLAC: | 3.957.961 | | | |
| | E_MAIL | Bittars16@hotmail.com | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | ROL | CA | AS | TU | JU - X |

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

| | | |
|-------------|------------|------------|
| 2010 | 07 | 19 |
| AÑO | MES | DÍA |

LENGUAJE. SPA

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

| NOMBRE DE ARCHIVO | TIPO MIME |
|---|--------------------|
| TESIS. Flujo crudo arena desarenador de placa.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: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

INGENIERO MECÁNICO

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

PRE-GRADO

ÁREA DE ESTUDIO:

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

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 son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién deberá participarlo previamente al Consejo Universitario, para su autorización"

Barrueta Brito, Jhonattan Alejandro

AUTOR

Ayala, Orlando

Da Silva, Carlos

Bittar, Simón

TUTOR

JURADO

JURADO

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS

Diógenes Suárez