



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

Facultad de Ingeniería

TRABAJO DE DIPLOMA

**DISEÑO DEL AGITADOR DEL TANQUE DE LA INSTALACIÓN SEMI-
INDUSTRIAL DE HIDROTRANSPORTE DEL ISMM DE MOA.**

AUTOR: José Manuel Salermo Piña.

TUTOR: Dr. C. Jesús Rafael Hechavarría Hernández.

Ms.C. Rodney Martínez Rojas.



HOLGUÍN

2014

José Manuel Salermo Piña.

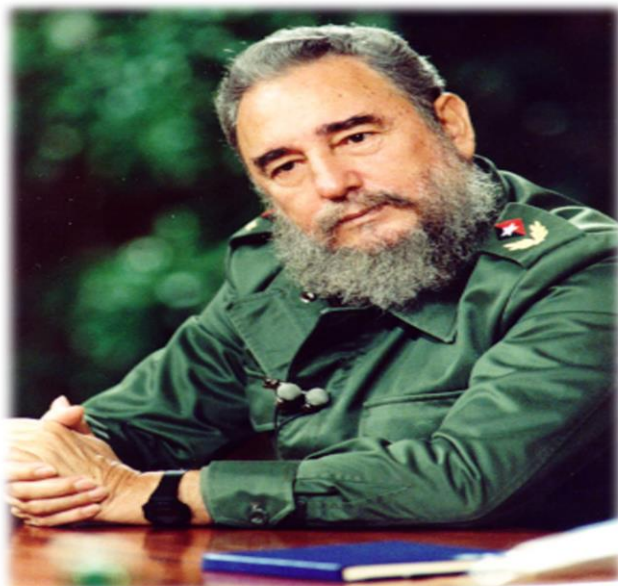
DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de diploma a mi familia y en especial a mis padres, a quienes debo todo lo que he logrado hasta hoy. Ellos supieron inculcar en mi la importancia que tiene sacrificarse para lograr cualquier meta que se desee en la vida .A ellos mi eterno agradecimiento.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento más profundo y sincero a todas las personas que de alguna manera han contribuido desinteresadamente en toda mi formación como ingeniero y en la elaboración de mi trabajo de diploma. En especial a mi tutor Jesús Rafael Hechavarría Hernández y a Rodney Martínez Rojas, a ellos mi agradecimiento por su ayuda desinteresada en la realización de este trabajo.

PENSAMIENTO



Consejos del Comandante En Jefe “Fidel Castro Ruz”.

A los revolucionarios más jóvenes, especialmente, recomiendo exigencia máxima y disciplina férrea, sin ambición de poder, autosuficiencia, ni vanaglorias .Cuídense de métodos y mecanismos burocráticos .No caer en simples consignas .Ver en la procedencia burocrática el peor obstáculo. Usar la ciencia y la computación sin caer en el lenguaje tecnisista e ininteligible de élites especializadas. Sed de saber, constancia, ejercicios físicos y también mentales .En la nueva era que vivimos, el capitalismo no sirve ni como instrumento, es como un árbol con raíces podridas del que solo brotan las peores formas de individualismo, corrupción y desigualdad. Tampoco puede regalarse nada a los que pueden producir y no producen o producen poco .Prémiese el mérito de los que trabajan con sus manos o su inteligencia. Lo bueno se espera, lo malo sorprende y desmoraliza .Estar preparado para lo peor, es la única forma de prepararse para lo mejor.

Fidel Castro 14 de enero del 2008.

Resumen

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio sobre los sistemas de agitación mecánica de instalaciones industriales, con el objetivo de establecer un procedimiento que permita diseñar un adecuado sistema de agitación para la instalación semi-industrial del ISMM de Moa. Se analizan los parámetros que caracterizan el caso de estudio para evaluar la influencia de los vínculos dimensionales en el comportamiento hidrodinámico del Cieno Carbonatado.

A partir de la modelación matemática de los componentes que intervienen en el análisis y los resultados obtenidos por el Método de Elementos Finitos utilizando herramientas CAD-CAE, se logra brindar al diseñador un conjunto de variantes, las cuales serán evaluadas bajo criterios técnicos y económicos.

Summary

SUMMARY

In the present I work a study on the systems of mechanical agitation of industrial facilities comes true, for the sake of establishing a procedure that it enables designing an adequate system of agitation for the semi-industrial installation of the ISMM of Moa. They analyze the parameters that characterize the case study to evaluate the influence of the dimensional links in the hydrodynamic behavior of the Carbonated Mud. From the mathematical modelation of the components that they tap in the analysis and the results obtained by the method of Finite Elements using tools the CAD-CAE, it is gotten to offer it to the designer a set of variants, which will be evaluated under technical and cost-reducing criterions.

Índice

INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE LOS AGITADORES MECÁNICOS.....	7
1.1 Agitadores.	7
1.1.1 Reseña histórica de los agitadores mecánicos.....	7
1.1.2 Agitación en la industria.....	8
1.1.3 Tipos de agitadores.	9
1.2 Trayectorias del flujo en la agitación.....	13
1.3 Clasificación del recipiente de agitación.	15
1.4 Propiedades del fluido.	17
1.5 Sedimentación.....	19
1.5.1 Principio de funcionamiento de los sedimentadores.....	19
1.5.2 Tipos de sedimentadores.	20
1.6 Análisis de fluidos utilizando la simulación a través del CAE.	22
1.6.1 Dinámica de fluidos computacional.	23
1.6.2 Conceptos básicos.	25
1.6.3 Aplicaciones.....	25
1.6.4 Ventajas del CFD.....	28
1.6.5 Desventajas de la CFD.....	28
1.6.6 Metodología de trabajo del CFD.....	29
1.6.7 Programas comerciales.	31
1.6.8 Simulaciones vs. Experimentos – Validación.	32
1.6.9 Actualidad.....	33
1.7 Flow Simulation.	35
1.7.1 Capacidades de Flow Simulation.....	35
1.7.2 Ecuaciones rectoras del movimiento de fluidos.....	36
1.7.3 Flow Simulation teoría de fondo.	36
1.7.4 Pasos para el análisis con el módulo Flow Simulation.	37
1.7.5 El proyecto de Flow Simulation.....	37

Índice

1.8 Estado actual de las investigaciones en agitadores de fluidos industriales.	39
1.9 Instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM.	40
CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN DE LA INSTALACIÓN SEMI-INDUSTRIAL DEL ISMM DE MOA.	42
2.1 Procedimiento para el diseño del sistema de agitación de la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa bajo criterios técnico-económicos.	43
2.2 Cálculo de los parámetros dimensionales del sistema mecánico de agitación.	44
2.2.1 Configuración del tanque.	44
2.2.2 Configuración del agitador propuesto.	44
2.3 Codificación a través de tecnología de grupo.	47
2.4 Cálculo de la potencia consumida.	47
2.5 Modelación en 3D del sistema de agitación utilizando Solid Works. ..	49
2.6 Análisis del proceso de agitación con el módulo Flow Simulation.	50
2.7 Análisis de las velocidades en función del diámetro del agitador.	53
2.7.1 Análisis de las velocidades de las variantes sin deflectores.	53
2.7.2 Análisis de las velocidades de las variantes con deflectores	57
2.8 Analisis de las simulaciones del agitador mecánico.	60
2.9 Análisis de la potencia de las variantes del agitador propuesto.	62
2.10 Análisis tensional del agitador por el método de elementos finitos.	63
2.10.1 Modelado geométrico del agitador en SolidWorks.	63
2.10.2 Análisis del agitador con el empleo del módulo Simulation.	64
2.11 Valoración económica.	71
2.12 Valoración medioambiental.	71
CONCLUSIONES.	73
RECOMENDACIONES.	74
BIBLIOGRAFÍA.	75

Índice

ANEXOS.	78
--------------	----

INTRODUCCIÓN

Paralelo a la Revolución Energética y con el objetivo de desarrollar nuestro país en materia de energía, el estado ha desarrollado estrategias en aras de ahorrar electricidad y combustible, así como obtener mejoras considerables en la calidad del trabajo. Para esto entre otras tareas se vienen introduciendo en el país nuevos equipos y tecnología de avanzada en la rama industrial, ya que en el año 2000 la industria del Níquel constituyó la primera fuente de exportación del país y se encuentra enfrascada en el proceso de ampliación de las capacidades instaladas y modernización de su tecnología.

El éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación y mezcla de fluidos. En la actualidad las industrias utilizan diversas formas para el proceso de agitación de minerales, pulpas, fluidos, entre otros compuestos que se producen a nivel mundial teniendo gran auge el proceso de agitación en este campo, debido a la capacidad que tienen los equipos de agitación o agitadores para la elaboración de las mezclas de los minerales o fluidos. A su vez, el crecimiento y perfeccionamiento de los procesos productivos están ligados con las mejoras de los equipos de agitación y con un mejor conocimiento de su funcionamiento y explotación.

A nivel industrial, son muchas las operaciones que se realizan destacándose entre estas, la agitación y mezclado, que es un proceso que se aplica de manera cotidiana en muchas de las instalaciones en dicho sector, para lo cual no importa el grado de complejidad que conllevan estos procesos. La simplicidad del equipo, muchas veces un tanque y un impulsor conectado a un motor, que suministra la energía, le resta importancia a esta operación. La instalación de estos tres elementos se realiza en la mayoría de las ocasiones de manera empírica, lo que genera problemas de sobre dimensionamiento, mayores tiempos de agitación para procesos por lotes o introducción de material extraño al que se agita, por ejemplo la introducción de aire,(Ulate & Vásquez, 2010) . Adicionalmente el equipo de agitación se utiliza indistintamente en más de una operación, algunas veces, un proceso intermedio por lo que éste adquiere relevancia. Estos procesos

Introducción

pueden ser una operación separada o bien integrada al proceso mismo, como lo es en un sistema reactivo, un burbujeador donde ocurra la absorción de un gas, un tanque donde ocurra un intercambio de calor, (Magdaleno, Navarro, & Nieto, 2002).

La agitación de pulpas es una de las operaciones más comunes de los procesos químicos y de industrias afines; es de importancia fundamental en la industria minera, petrolera, de alimentos, química, farmacéutica, de pulpa y papel, por mencionar algunas. La agitación de pulpas se emplea con distintos fines, según el objetivo que se pretenda en la etapa de proceso.

Estos sistemas se encuentran no solo en industrias, están presentes en centros de estudios dedicados a la investigación, como laboratorios, instalaciones semi-industriales, plantas pilotos y otros.

El Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM) es una institución universitaria para la formación integral y continua de profesionales competitivos contribuyendo con el desarrollo de investigaciones científicas y acciones de innovación tecnológica y gestión del conocimiento en las ramas geólogo-minero, Metalúrgica-Electromecánica con alta calidad, relevancia y pertenencia para contribuir con la eficiencia y racionalidad de la industria cubana.

En la carrera de Ingeniería Mecánica se consta con diferentes áreas y laboratorios para la docencia y la investigación, destacándose la instalación semi-industrial de hidrotransporte, en el área de mecánica de los fluidos, dicha instalación consta de un sistema de bombas, tuberías y tanque a escala semi-industrial que permite el desarrollo de servicios a las industrias minero metalúrgicas, materiales de la construcción y recursos hidráulicos. El tanque con que consta el sistema tiene una capacidad de alrededor de 5.20 m³, el cual tiene como función la de almacenar y preparar el fluido que se transporta. Actualmente existe un sistema moto-reductor agitador en el interior del tanque que tiene como función la limpieza del fondo del tanque ante la sedimentación de las partículas sólidas de las pulpas preparadas. Este sistema aunque cumple con su función de limpieza, no garantiza una correcta preparación, homogenización y mezclado del fluido o material a

Introducción

transportar. Por lo que el sistema presenta las siguientes deficiencias:

1. No se cuenta con un sistema de agitación mecánica que garantice la homogenización del fluido.
2. Insuficiente conocimiento de los parámetros de funcionamiento de un sistema de agitación a partir de la geometría del tanque actual.

Se hace necesario el diseño de un agitador que permita una correcta preparación, homogenización y mezclado del material.

Se define como **problema de investigación:**

La no existencia de un procedimiento que permita modelar y simular el proceso de homogenización del fluido no newtoniano en el tanque de lodo de la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa.

Objeto de estudio:

La dinámica computacional de los fluidos no newtonianos.

Campo de acción:

Diseño de un sistema de agitación mecánica para la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa.

Hipótesis:

Si se desarrolla un procedimiento que permita evaluar la influencia de los parámetros dimensionales del agitador en el comportamiento de la homogenización del lodo a partir de tecnologías de avanzadas, CAD-CAE, se podrá mejorar el proceso de toma de decisiones durante el diseño del agitador del tanque de la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa.

Objetivo general:

Desarrollar un procedimiento que permita evaluar la influencia de los parámetros dimensionales del agitador en el comportamiento de la homogenización del lodo de la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa.

Tareas de investigación:

1. Visitar a la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa.
2. Estudiar la mecánica de fluidos no newtonianos.
3. Estudiar diseños de agitadores de instalaciones industriales.

Introducción

4. Estudiar los parámetros técnicos de las instalaciones de hidrotransporte.
5. Modelar tridimensionalmente el sistema de agitación en el software SolidWorks 2013.
6. Simular la influencia de las variantes de diseño en la homogenización del fluido con el uso del módulo Flow Simulation.
7. Analizar a través del método de elementos finito el estado tensional del sistema de agitación con el uso del módulo Simulation.
8. Escribir del trabajo de diploma.

Los **métodos** utilizados con el objetivo de la interpretación de la información empírica obtenida y el análisis de las fuentes impresas para el establecimiento de generalizaciones y las regularidades fueron los siguientes:

1. Método Histórico - Lógico: se empleó en el estudio del estado del arte, como marco teórico referencial, en función de la teoría de intervención y su relación con otras ciencias.
2. Método de Inducción - Deducción: a partir de situaciones concretas se recopiló información para analizarla en un marco teórico general, que permitió la valoración del diseño de sistemas mecánicos de agitación en el ámbito nacional y en particular deducir regularidades en el procedimiento de esta actividad y en los métodos para su evaluación y selección.
3. Método de Análisis y Síntesis: se empleó para determinar los factores claves que influyen en el fenómeno, interrelacionar los efectos presentados que constituyen explicaciones al problema, analizar los nexos internos y las dependencias recíprocas.
4. Método de Observación: se acudió al conocimiento del problema para mantener el vínculo con el personal en relación con el objeto, a través de entrevistas, estudios de casos, investigaciones precedentes, análisis de la experiencia acumulada, por lo que se adquirió conocimiento en la investigación.

La tesis consta de dos capítulos. Los aspectos más relevantes abordados en cada uno de ellos se tratan brevemente a continuación:

Introducción

En el capítulo 1 se exponen los fundamentos que permiten el estudio de los sistemas de agitación, se presentan las particularidades de su diseño, el estado actual de desarrollo a partir de las más recientes investigaciones realizadas y por último se argumenta la necesidad de emplear técnicas avanzadas para la modelación y simulación del proceso.

En el capítulo 2 se propone un procedimiento bajo criterios técnico-económicos que permita brindar al diseñador un conjunto de variantes para evaluar la influencia de los vínculos dimensionales en la homogenización del fluido, además se dedica a la descripción detallada del procedimiento en un caso de estudio. Se tomó como caso de estudio, la instalación semi-industrial del ISMM de Moa y se demuestra la importancia de aplicar los módulos de Flow Simulation y Simulation del Solid Works 2013.

En aras de enriquecer la fundamentación de los diversos temas tratados en cada uno de los capítulos, fue necesario profundizar en algunos temas que sirven de base a la investigación desarrollada y que se resumen en los anexos. También fue indispensable ilustrar en ellos los resultados obtenidos así como las tablas e imágenes que permiten la comprensión de los cálculos técnicos y económicos como resultado de la modelación matemática.

Finalmente, se presentan las conclusiones a las que se arribó con el desarrollo de esta investigación, se recomiendan un conjunto de acciones cuyo cumplimiento deberá asegurar su continuidad e incluso mejorar los resultados obtenidos, se recoge la bibliografía investigada para alcanzar los conocimientos básicos necesarios sobre los diversos temas estudiados y que han sido referenciados en el documento de tesis.

Los resultados alcanzados en esta investigación son frutos de la colaboración entre el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y la Universidad de Holguín.

CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE LOS AGITADORES MECÁNICOS.

1.1 Agitadores.

Los agitadores son equipos que tienen una amplia gama de aplicaciones en las industrias, ya que el éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación y mezcla de fluidos. La agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente (Pérez, 2013). A continuación se realizará el análisis de los distintos aspectos relacionados con el tema expuesto en la bibliografía consultada, con la finalidad de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resulten esenciales para el correcto desarrollo del trabajo.

1.1.1 Reseña histórica de los agitadores mecánicos.

El primer agitador industrial fue usado hace unos cien años en una planta de fertilizantes, se trataba de una hélice marina. Más adelante se inventaron agitadores de forma muy diversa con geometría escogida a menudo, más por su estética que por su eficiencia.

Es solo a partir de los años 50 que se empezó a investigar las relaciones entre la herramienta de agitación y su resultado concerniente al grado de mezclado. Hoy en día se entienden las reglas fundamentales de funcionamiento y de desempeño de los agitadores industriales.

Sin embargo se siguen las investigaciones para comprender en detalles las transferencias de cantidad de movimiento, masa y calor producidas por los muy variados métodos de inducción de la agitación, a saber: rotación, vibración, bombeo, flujo restringido, chorro, burbujeo, ultrasonido. Las investigaciones se han realizado en dos direcciones principales; de un lado hacia la creación y desarrollo de nuevos sistemas y aparatos y del otro lado hacia la cuantificación de la calidad de la mezcla.

1.1.2 Agitación en la industria.

La agitación es una operación mecánica que consiste en realizar movimientos violentos e irregulares en el seno de una masa fluida o que se comporte como tal para obtener una mezcla homogénea, es decir, mantener la concentración constante en todas las partes de la masa. Mediante esta operación se consigue la introducción de energía en el volumen del fluido, o sea, que la energía cinética que posee el impelente se transfiere al fluido provocando su movimiento. Los impelentes utilizados con estos objetivos pueden ser clasificados por el flujo que inducen en el tanque agitado como impelentes de flujo axial y de flujo radial. Entre los impelentes de flujo radial el más utilizado industrialmente es la de turbina de disco con paletas planas, por lo que a pesar de haber sido ampliamente estudiado, continúa siendo objeto de investigación.

Los tanques agitados por su parte, han sido utilizados históricamente en la industria alimenticia, la química y la biotecnología, constituyendo el tipo de reactor utilizado por excelencia. Este hecho constituye la causa fundamental que en la actualidad se continúen las investigaciones básicas sobre la hidrodinámica en el tipo de reactor.

La agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. Los objetivos de la agitación pueden ser:

- Mezcla de dos líquidos miscibles (alcohol y agua).
- Disolución de sólidos en líquido (azúcar y agua).
- Mejorar la transferencia de calor (en calentamiento o enfriamiento).
- Dispersión de un gas en un líquido (oxígeno en caldo de fermentación).
- Dispersión de partículas finas en un líquido.
- Dispersión de dos fases no miscibles (grasa en la leche).

Generalmente el equipo consiste en un recipiente cilíndrico (cerrado o abierto), y un agitador mecánico montado en un eje y accionado por un motor eléctrico. Las proporciones del tanque varían ampliamente, dependiendo de la naturaleza del

problema de agitación. El fondo del tanque debe ser redondeado con el fin de eliminar los bordes rectos o regiones en las cuales no penetrarían las corrientes del fluido. La altura del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque. Sobre un eje suspendido desde la parte superior, va montado un agitador. El eje está accionado por un motor, conectado a veces directamente al mismo, pero con mayor frecuencia a través de una caja de engranajes reductores.



Figura 1.1. Tanque con agitación mecánica. Fuente: (Pérez, 2013)

El agitador crea un cierto tipo de flujo dentro del sistema, provocando la circulación del líquido por todo el recipiente y luego retorne al agitador.

1.1.3 Tipos de agitadores.

El rodete o agitador suele estar unido a un eje cilíndrico formando un conjunto, que en general está situado concéntricamente con el recipiente. La excentricidad e inclinación del eje se pueden variar para lograr rendimientos mayores. En la figura 1.2 se pueden ver algunos tipos de agitadores que se utilizan en la industria.

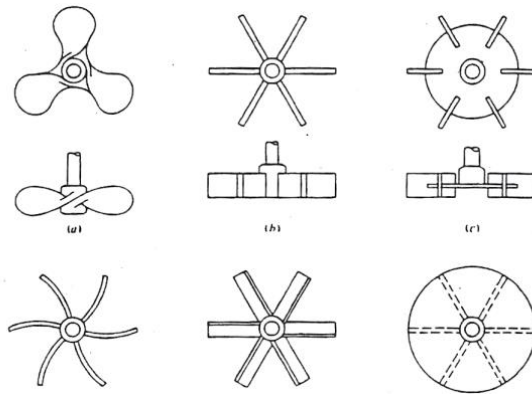


Figura 1.2. Algunos tipos de agitadores mecánicos. Fuente:(Taghavi, 2011).

De acuerdo con lo expresado por (McCabe, 1993), los agitadores se dividen en dos clases que están relacionados directamente con los patrones de flujo (representaciones en 2D de la distribución del flujo dentro del tanque, ver figura 1.3): los agitadores radiales y los axiales. Los que generan corrientes paralelas al eje del impulsor que se denominan impulsores de flujo axial, y los que generan corrientes en dirección radial tangencial que se llaman impulsores de flujo radial.

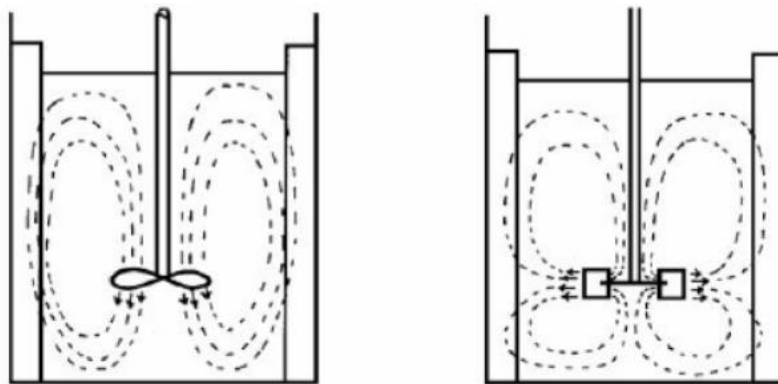


Figura 1.3. Izquierda: patrón de flujo generado por una turbina axial, derecha: patrón de flujo generado por una turbina radial. Fuente: (Taghavi, 2011).

Los tres tipos principales de agitadores son, de hélice, de paletas, y de turbina según se representa en la figura 1.4.

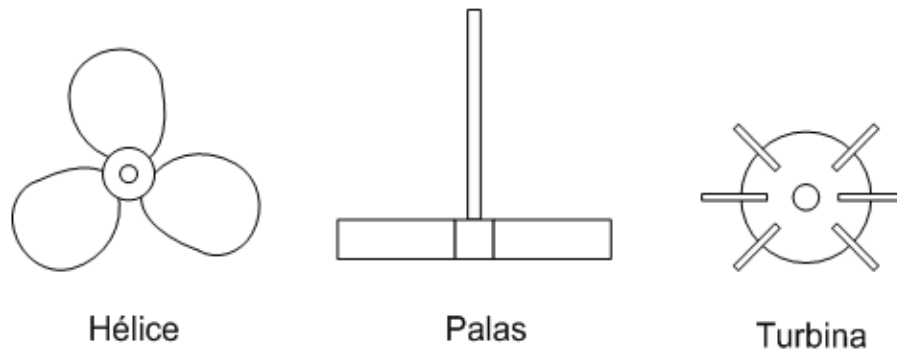


Figura 1.4. Principales tipos de agitadores. Fuente:(Taghavi, 2011).

De hélices: Una hélice es un rodete con flujo axial y alta velocidad que se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Las hélices pequeñas giran con la misma velocidad que el motor, entre 1150 y 1750 rev/min, las grandes giran entre 400 y 800 rev/min. Las corrientes de flujo que salen del rodete continúan a través del líquido en una dirección determinada hasta que chocan con el fondo o las paredes del tanque. La columna, altamente turbulenta, de remolinos de líquido que abandona el rodete, arrastra al moverse líquido estancado, probablemente en mayor proporción que lo haría una columna equivalente procedente de una boquilla estacionaria. Las placas de un rodete cortan o cizallan vigorosamente el líquido.

Debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélices son eficaces en tanques muy grandes. Una hélice giratoria traza una hélice en el fluido y si no hubiese deslizamiento entre el fluido y la hélice, una revolución completa provocaría el deslizamiento longitudinal del líquido una distancia fija, dependiendo del ángulo de inclinación de las palas de la hélice. La relación entre esta distancia y el diámetro de la hélice se conoce como paso de hélice. Una hélice con un paso de 1,0 se dice que tiene paso cuadrado.

Las más frecuentes son las hélices marinas de tres palas con paso cuadrado, para fines especiales se utilizan hélices de cuatro palas, ruedas dentadas y otros diseños. Las hélices raramente superan las 18 pulgadas de diámetro, con independencia del tamaño del tanque.

Capítulo I

En tanques profundos pueden insertarse dos o más hélices sobre el mismo eje, generalmente dirigiendo el líquido en la misma dirección. A veces, dos hélices operan en direcciones opuestas, o en (push pull), con el fin de crear una zona de turbulencia especialmente elevada entre ellas.

De Paletas: para los problemas más sencillos, un agitador eficaz consta de una pala plana que gira sobre un eje vertical. Son frecuentes los agitadores de dos y cuatro palas. A veces las palas están inclinadas, pero lo más frecuente es que sean verticales. Las palas giran a bajas o moderadas velocidades en el centro del tanque, impulsando el líquido radial y tangencialmente sin que haya prácticamente movimiento vertical excepto que las placas estén inclinadas.

Las corrientes que generan se desplazan hacia fuera hasta la pared del tanque y después hacia arriba o hacia abajo. En tanques profundos se instalan varias palas, unas sobre otras en un mismo eje. En algunos diseños las placas se adaptan a la forma de las paredes del tanque, de forma que rascan la superficie y pasan sobre ella con una muy pequeña holgura. Una pala de este tipo recibe el nombre de agitador de áncora. Las áncoras resultan útiles para prevenir que se depositen sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, tal como un tanque encamisado, pero en cambio son malos mezcladores. Casi siempre operan conjuntamente con un agitador de alta velocidad que generalmente gira en sentido contrario.

Los agitadores industriales de palas giran a velocidades comprendidas entre 20 y 150 rev/min. La longitud total de un rodete de palas está típicamente comprendido entre el 50 y el 80 por 100 del diámetro interior del tanque. La anchura de la pala es de un sexto a un décimo de su longitud. A velocidades muy bajas los agitadores de palas generan una agitación muy suave en tanques sin placas deflectoras, las cuales son necesarias para velocidades más elevadas, pues de lo contrario el líquido se desplaza en bloque alrededor del tanque con velocidad alta, pero con poca mezcla.

Turbinas: La mayoría de ellos recuerdan a los agitadores con numerosas palas cortas, que giran a altas velocidades sobre un eje montado centralmente en el

tanque. Las placas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El rodete puede ser abierto, semi-cerrado o cerrado.

El diámetro del rodete es menor que el de las palas, variando entre el 30 y el 50 por 100 del diámetro del tanque. Las turbinas son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades. En líquidos de baja viscosidad las turbinas generan fuertes corrientes que persisten en todo el tanque, destruyendo bolsas de fluido estancado. Cerca del rodete hay una zona de corrientes rápidas, elevada turbulencia e intensa cizalladura. Las corrientes principales son radiales y tangenciales. Los componentes tangenciales inducen la formación de vórtices y remolinos, que deben ser destruidos por placas deflectoras o por un anillo difusor para que la agitación sea eficaz.

1.2 Trayectorias del flujo en la agitación.

Cualquiera que sea el tipo de impulsor propulsor seleccionando éste, debe crear condiciones turbulentas dentro de la corriente móvil del fluido. La velocidad de un líquido en un tanque agitado tiene 3 componentes:

- Uno radial que actúa en una dirección perpendicular al eje.
- Una longitud que actúa paralela al eje (y).
- Una rotacional que actúa en dirección tangencial al círculo de rotación del eje.

Los dos primeros componentes generalmente contribuyen al mezclado pero el tercero puede no hacerlo. Cuando los impulsores-agitadores se montan verticalmente en el centro del tanque, casi siempre se desarrolla una trayectoria de flujo circular tipo remolino que desarrolla un vórtice (fig. 1.5.) y que atrapa aire, lo cual es indeseable generalmente.

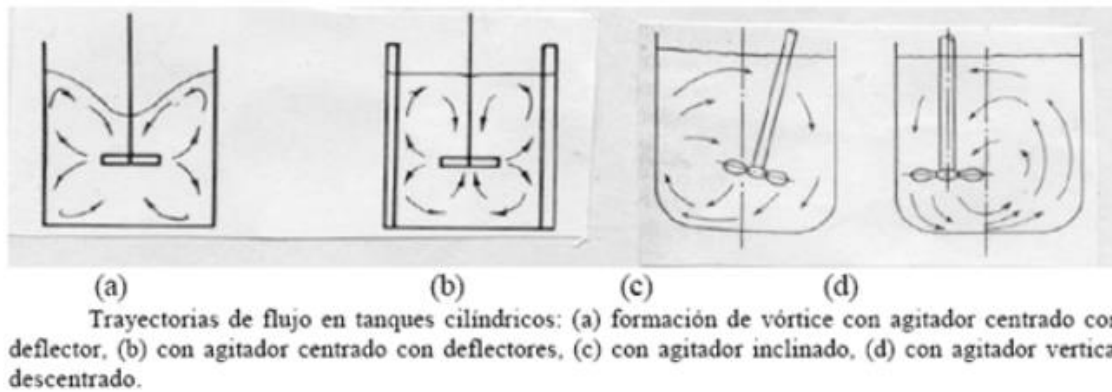


Figura 1.5. Trayectorias del flujo en la agitación. Fuente: (Perry, 2001).

Los vórtices causan un desbalance de fuerzas y limitan severamente el uso de las potencias suministradas. Una forma de romper éste vórtice es el de colocar al propulsor agitador en una posición angular (fig. 1.5.c) o desplazada de centro (fig. 1.5.d).

Otra manera es el emplear deflectores (fig. 1.5.b), que se montan en forma vertical en las paredes de los tanques, casi siempre son 4 y tienen una anchura de alrededor de $1/8$ del diámetro del tanque.

Formas de evitar remolinos.

Colocando al agitador fuera del eje central del tanque. En tanques pequeños se debe colocar el rodete separado del centro del tanque, de tal manera que el eje del agitador no coincida con el eje central del tanque. En tanques mayores el agitador puede montarse en forma lateral con el eje en un plano horizontal, pero no en la dirección del radio.

Instalando placas deflectoras. Estas son placas verticales perpendiculares a la pared del tanque. En tanques pequeños, es suficiente 4 placas deflectoras para evitar remolinos y formación de vórtice. El ancho de las placas no debe ser mayor de un doceavo del diámetro del tanque. Cuando se usan agitadores de hélice, el ancho de la placa puede ser de un octavo del diámetro de tanque. Si el eje del agitador está desplazado del centro o inclinado, no se necesitan placas deflectoras.

Cuando no se presenten remolinos, el tipo de flujo específico depende del tipo de rodete:

Los agitadores de hélice impulsan el líquido hacia el fondo del tanque, donde la corriente se extiende subiendo por las paredes y retornando hacia la hélice. Se emplean cuando se desean intensas corrientes verticales, por ejemplo, para mantener en suspensión partículas sólidas pesadas. No se emplean cuando la viscosidad del líquido es superior a los 5.000 centipoises.

Los agitadores de paletas producen un flujo radial intenso en el plano próximo a las palas, pero prácticamente no dan lugar a corrientes verticales. Estos agitadores no son eficaces para mantener sólidos en suspensión.

Los agitadores de turbina impulsan al líquido radialmente contra las paredes laterales del tanque donde la corriente se divide, una parte influye hacia arriba y la otra parte hacia el fondo, retornando ambas al rodete, por lo que producen dos corrientes de circulación separadas. Dan excelentes resultados en la mezcla de líquidos que tienen aproximadamente la misma densidad relativa.

1.3 Clasificación del recipiente de agitación.

Recipientes sin deflectores.

Al agitar un líquido en un recipiente mediante un agitador posicionado axialmente, habrá una tendencia a que se desarrolle un flujo de remolino, independientemente del tipo de impulsor que se utilice. Al encontrarse el líquido en rotación, se produce un vórtice debido a la fuerza centrífuga que actúa sobre el líquido que gira.

En caso de rotación rápida de los agitadores y fluidos de baja viscosidad, el vórtice puede alcanzar la cabeza del agitador con el resultado que el agitador arrastre aire en el líquido. Esto es generalmente indeseable porque resulta en esfuerzos extraordinariamente grandes sobre el eje del agitador, los apoyos y juntas, debido a la ausencia del soporte del líquido. Esto a menudo conduce a la destrucción del agitador, incluso cuando la formación del vórtice no causa entrada

de aire, la rotación del líquido es siempre indeseable cuando se refiere a un sistema de dos fases con diferentes densidades, ya que la fuerza centrífuga contrarresta el proceso de agitación. En la figura 1.6 puede verse el patrón usual de flujo en un recipiente sin deflectores.

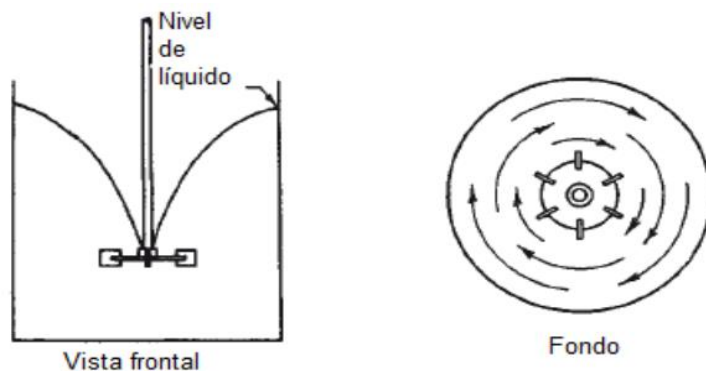


Figura 1.6. Patrón usual en un recipiente sin deflectores. Fuente:(Perry, 2001).

Recipientes con deflectores.

La rotación del líquido en tanques cilíndricos se previene con la instalación de deflectores que son bandas planas verticales, situados radialmente y a lo largo de la pared del tanque. La llamada deflexión completa se realiza con cuatro deflectores.

Deflectores

La altura habitual para los tabiques deflectores es de $DT/10$, donde DT es el diámetro del recipiente. Las zonas muertas en la dirección del flujo detrás de los deflectores se pueden evitar usando deflectores de $DT/12$ de ancho, estableciendo una separación con la pared del recipiente, con lo cual se logra también minimizar la acumulación de sólidos sobre ellos o bien en su parte posterior.

La utilización de tabiques deflectores da como resultado una gran circulación desde la parte superior al fondo del recipiente, sin que se formen vórtices ni se ejerzan tensiones no balanceadas del flujo sobre el eje de impulsión, como se muestra en las figuras 1.7 y 1.8.

Los deflectores no son necesarios si la agitación se lleva a cabo en recipientes de sección transversal rectangular o cuando el agitador se monta lateralmente en la pared del tanque. En caso de agitación débil, la rotación del líquido se puede prevenir instalando el agitador excéntrico y/o en ángulo con respecto al eje del tanque.

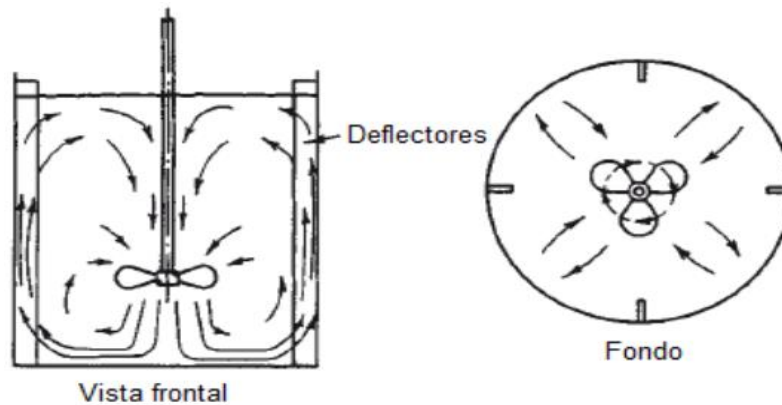


Figura 1.7. Patrón de flujo axial, recipiente con deflectores. Fuente: (Perry, 2001)

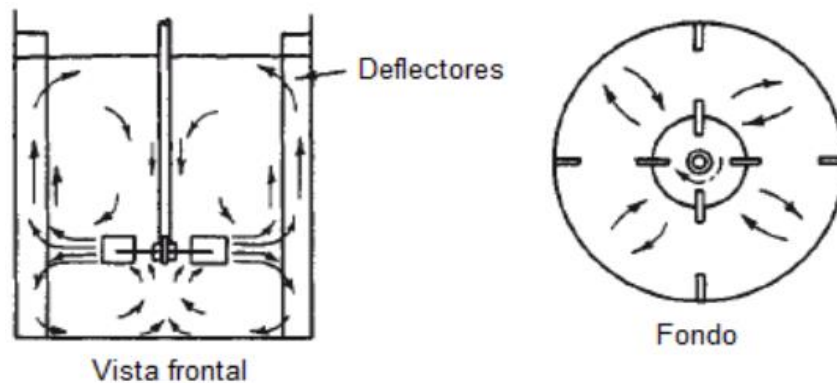


Figura 1.8. Patrón de flujo radial, recipiente con deflectores. Fuente: (Perry, 2001).

1.4 Propiedades del fluido.

La rama de la mecánica que estudia el comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo o en movimiento, se le llama "Mecánica de los Fluidos". En la estática de los fluidos, el peso específico es la propiedad importante, mientras que en el flujo de fluidos, la densidad y la viscosidad son las que predominan. Cuando tiene lugar una compresibilidad apreciable es necesario considerar los principios de la

Capítulo I

termodinámica. Al intervenir presiones manométricas negativas, la tensión de vapor adquiere importancia, y la tensión superficial afecta a la estática o cinemática de los fluidos cuando las secciones de paso son pequeñas, según plantea (Torres, 2000).

Los fluidos son sustancias que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen. Cuando están en equilibrio no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma. Los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases, según (Greene, 1995). Los líquidos son prácticamente incompresibles, ocupan un volumen definido y tiene superficies libres, sin embargo los gases son compresibles, se expansionan hasta ocupar todas las partes del recipiente que los contenga.

El fluido con el cual se trabajara se denomina Cieno carbonatado (coral): Procedente de los yacimientos situados en la bahía de Moa es de color gris claro, con restos de conchas de organismos marinos que son eliminados en el proceso de beneficio del coral, donde se convierte en una pulpa cruda, espesa, con 15 a 25 % de sólido, que se utiliza para la neutralización del licor crudo (pH=2) procedente de la Planta de Lavaderos para llevarlo a un pH=2,6 y de esta forma garantizar la eficiencia de precipitación, ya que el ácido libre en el licor tiene un efecto negativo en la precipitación de los sulfuros. (García, Puyáns, Purón, & Angélica, 2010)

Tabla 1: Condiciones de trabajo y propiedades de la suspensión. Fuente: (García., Puyáns, Purón, & Angélica, 2010)					
Suspensión	pH	T (°C)	Concentración de sólido (%)	Densidad, ρ(kg/m³)	Gravedad específica, Gs
Cieno Carbonatado	7,02	29,4	50	1450	2,58

Un estudio efectuado por (Pérez, 2013) arrojó que la velocidad promedio de sedimentación del cieno carbonatado es de 0.11 m/s. Por lo cual el análisis a realizar debe centrarse en buscar las variantes dimensionales que permitan lograr velocidades mayores al valor crítico de homogenización.

1.5 Sedimentación.

La sedimentación es una operación unitaria consistente en la separación por la acción de la gravedad de las fases sólida y líquida de una suspensión diluida para obtener una suspensión concentrada y un líquido claro.

1.5.1 Principio de funcionamiento de los sedimentadores.

El principio de funcionamiento de los sedimentadores es muy simple. Los brazos de arrastre en un tanque espesador se desplazan a velocidad constante dentro de la masa de lodos decantada en su fondo, esta acción de barrido de las paletas genera un efecto de reacción en forma de par resistente que es transmitida a través del eje central hasta los accionamientos de los cabezales (engranajes). Estos elementos mecánicos, sometidos a esfuerzos variables van a señalar por medio de sus indicadores mecánicos los niveles del par que están soportando en cada momento (Pérez, 2013).

Cuando se emplean más de un sedimentador, en el primero se suministra la suspensión y se separan las partículas de mayor tamaño y mayor velocidad de precipitación, el flujo de derrame pasa al siguiente donde se produce otra separación y el proceso continúa en los restantes controlándose la velocidad del flujo ascendente de agua para obtener el intervalo de tamaño deseado.

Los tanques de sedimentación pequeños deben ser proyectados sin equipos mecánicos. Pueden ser de diversas formas: rectangular, circular o cuadrado; los rectangulares podrán tener varias tolvas y los circulares o cuadrados una tolva central, como es el caso de los sedimentadores tipo Dormund. La inclinación de las paredes de las tolvas será aproximadamente de 60° con respecto a la horizontal.

Los parámetros de diseño son similares a los de sedimentadores con equipos mecánicos. Los tanques de mayor dimensión usarán equipo mecánico para el barrido de lodos y transporte del mismo.

1.5.2 Tipos de sedimentadores.

En la actualidad existen diversos tipos de sedimentadores que se dividen según su forma, características y aplicaciones. Estos son: sedimentadores analíticos, separativos, dinámicos, estáticos, de lodos activados y de placas inclinadas.

1.5.2.1 Sedimentadores analíticos.

Los sedimentadores analíticos pueden ser granulómetros y sedimentómetros teniendo en cuenta el mecanismo. Los primeros constituyen uno de los más relevantes grupos de analizadores de tamaño de partículas y siguen siendo insustituibles en el calibrado para otras técnicas. El tamaño y forma son conceptos polisémicos, no exentos de ambigüedad, las técnicas de análisis han de seleccionarse de forma que el tipo de tamaño suministrado por la técnica elegida sea el más adecuado a la fenomenología que se tenga entre manos. El segundo tipo de analizadores, también llamados jar-tests suministran datos de velocidad masiva de Sedimentación a partir del seguimiento del avance del frente de sedimentos (las pruebas clásicas de agentes coagulantes y floculantes se hacían en probetas de ensayo que han dado nombre a la técnica).

1.5.2.2 Sedimentadores separativos.

El tamaño útil del recinto depende del mecanismo de separación, si este es un fenómeno de transferencia el tamaño útil será la superficie eficaz abierta a dicha forma de transferencia, es decir, la superficie normal al flujo de propiedad.

Si el fenómeno separador es una sedimentación gravitacional, el consumo de energía vinculado al transporte viscoso depende del área de la superficie interracial, lo que justifica que una mayor superficie específica signifique una mayor transferencia y por tanto un tiempo de relajación más corto. Sin embargo,

la superficie eficaz para el fenómeno macroscópico de desplazamiento material será la superficie horizontal.

1.5.2.3 Sedimentadores dinámicos.

Estos suelen combinar el mecanismo de sedimentación con sistemas de movilización del sedimento por flujo continuo o pulsante, generalmente con el fin de producir efectos complementarios de arrastre o de filtración de sobrenadantes, de asentamiento del propio sedimento o de recirculación del mismo en condiciones de baja carga externa.

1.5.2.4 Sedimentador de placas inclinadas.

El sedimentador de placas inclinadas (SPI) está formado por dos componentes principales: el depósito superior, que contiene las placas lamelares con una inclinación de 55° y el depósito de sedimentos inferior, de forma cónica o cilíndrica (Pérez, 2013).

El material se introduce en el SPI por unas cámaras verticales a cada lado de los conjuntos lamelares y pasa a los orificios de separación de las placas a través de unas ranuras de alimentación. La clarificación se produce por encima de la entrada de la suspensión, por lo que el líquido clarificado no se mezcla con el material de alimentación entrante.

Encima de cada conjunto hay una canal de rebosamiento de longitud completa equipado con orificios de regulación para crear una ligera contrapresión hidráulica sobre el flujo de alimentación entrante. Este método de control de la alimentación garantiza una distribución igualitaria entre todas las cámaras lamelares, con una turbulencia mínima en los puntos de entrada.

Los sólidos se asientan sobre cada placa lamelar y descienden resbalando hasta el depósito de sedimentos, donde continúan siendo espesados y comprimidos con ayuda del sistema de cuñas.

1.6 Análisis de fluidos utilizando la simulación a través del CAE.

Al observar nuestro alrededor es posible contemplar multitud de fenómenos asociados a los fluidos y a las leyes que los rigen. Van desde el vuelo de un ave hasta el agua que fluye por una tubería, desde la aerodinámica de un carro de fórmula uno hasta la fricción del traje de baño de un nadador, desde las emisiones de contaminantes por parte de industrias hasta el comportamiento atmosférico del aire. A partir de la curiosidad y necesidad de comprender el trasfondo del comportamiento de los fluidos, los científicos plantearon formulaciones para su estudio utilizando las matemáticas. Desde la antigüedad, ya Arquímedes analizaba el comportamiento de fluidos como el agua. Observó, entre otras cosas, cómo un fluido sometido a presión se desplaza desde la zona de mayor presión hasta la de menor. Fue ya Leonardo Da Vinci en el siglo XV quien realizó grandes contribuciones al estudio del comportamiento de los fluidos mediante el planteamiento de ecuaciones matemáticas. Uno de los trabajos más destacados fue la creación de la ecuación de continuidad o principio de conservación de masa (Orrego, 2009).

Pasando por valiosos contribuyentes al desarrollo de la mecánica de fluidos, a finales del siglo XIX, fueron Claude-Luís Navier (ver Figura 1.9) y George Stokes los que formularon teorías sobre la fricción interna de fluidos de movimiento y derivaron la famosa ecuación de Navier-Stokes. Se trata de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Al solucionar esta ecuación se puede conocer el valor de las variables de un fluido tales como velocidad, presión, temperatura, entre otros.



Figura 1.9. Claude-Luis Navier.

Actualmente no se dispone de una solución general analítica para este conjunto de ecuaciones, salvo ciertos tipos de flujo y situaciones muy concretas. Debido a esto se debe recurrir al análisis numérico para determinar una solución aproximada. A la rama de la mecánica de fluidos ocupada de la obtención de estas soluciones mediante computadores se denomina dinámica de fluidos computacional (CFD, de su acrónimo anglosajón Computational Fluid Dynamics),(Orrego, 2009).

1.6.1 Dinámica de fluidos computacional.

La dinámica de fluidos computacional es una de las rama de la mecánica de fluidos que usa métodos numéricos y algoritmos para estudiar y analizar problemas que involucran fluidos en movimiento, mediante la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, transferencia de calor e incluso otras reacciones químicas en el computador. Existen diferentes métodos numéricos y algoritmos que resuelven de distinta forma las ecuaciones fundamentales.

En otras palabras, la dinámica de fluidos computacional es el arte de reemplazar los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales en un sistema algebraico de ecuaciones que pueden ser resueltas usando computadores.

Un dato curioso es que actualmente han pasado más de 150 años después de la definición de las ecuaciones de Navier-Stokes, y es ahora cuando se están pudiendo resolver mediante técnicas de cálculo aplicadas en computadores. La siguiente figura muestra una imagen de un ejemplo de los resultados (campo de presiones) de una simulación CFD al transbordador espacial, (Orrego, 2009).

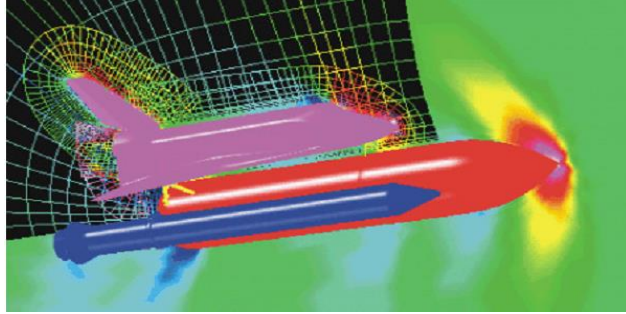


Figura 1.10. Shuttle Aerosoft©.

La historia de la dinámica de fluidos computacional (CFD), como es lógico, va ligada a la evolución de los ordenadores. Surgió en la década de los 70 como medio para simular fluidos en movimiento, aunque para situaciones muy simples en aplicaciones aeroespaciales e industrias donde la predicción del comportamiento del flujo era importante. Con la evolución de los supercomputadores y con el desarrollo de nuevas técnicas numéricas, los problemas que se podían resolver eran cada vez más complejos. Ya a principios de los años 80 resolvían las ecuaciones de Euler en dos y posteriormente en tres dimensiones. A mediados de la década de los 80 se fue desplazando el interés hacia los fluidos viscosos y por tanto hacia la resolución completa de la ecuación de Navier-Stokes.

En los 90 el uso de la CFD se ha expandido de forma significativa a distintas aplicaciones y procesos industriales en los que interviene transferencia de calor, reacciones químicas (como combustión), flujos bifásicos, cambios de fase, transferencia de masa y esfuerzos al interactuar con sólidos, entre otros.

Actualmente el uso de esta herramienta ha cambiado radicalmente. Ha pasado de ser empleado solo a nivel de investigación a ser utilizado como una potente herramienta en problemas aplicados de ingeniería de carácter industrial,(Orrego, 2009).

1.6.2 Conceptos básicos.

La dinámica de fluidos computacional proporciona información cualitativa y cuantitativa de la predicción del flujo de fluido por medio de la solución de las ecuaciones fundamentales usando métodos numéricos.

La CFD permite a los científicos e ingenieros desarrollar “experimentos numéricos” (simulaciones computacionales) en un “laboratorio virtual” (computador). Estos experimentos permiten predecir comportamientos y conocer datos de las variables involucradas en el proceso. Por ejemplo, un diseñador requiere conocer el comportamiento aerodinámico del ala de un avión (datos de velocidades, presiones y fuerzas alrededor del ala). Con la herramienta CFD se puede “montar” un experimento virtual que permita conocer en detalle el valor y comportamiento de las variables necesarias en un determinado escenario. La información generada es importante y clave para comprobar el diseño y mejorar la eficiencia y comportamiento del ala. La figura 1.11 muestra una imagen comparativa de los resultados obtenidos por métodos experimentales y métodos numéricos, sobre un mismo escenario y problema, (Orrego, 2009).

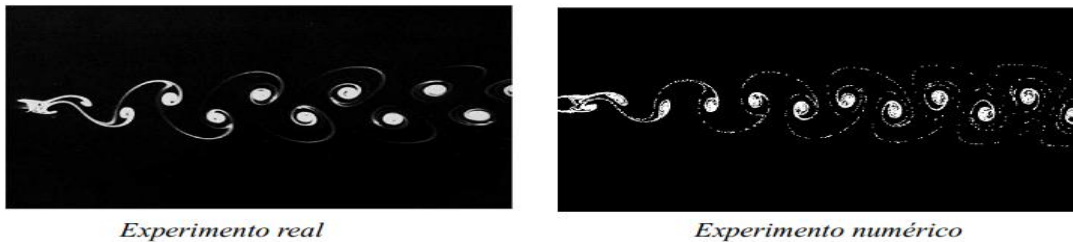


Figura 1.11. Vórtices de Von Karman. Kuzmin©.

1.6.3 Aplicaciones.

En la actualidad son múltiples los campos a los que se aplica la dinámica de fluidos computacional. La industria del automóvil es uno de estos campos, donde, por ejemplo, se puede simular el comportamiento aerodinámico del coche, de hecho las escuderías de fórmula uno emplean este tipo de software para mejorar

Capítulo I

el rendimiento de sus coches. También en el ámbito deportivo cabe destacar el uso en estudios aerodinámicos en el ciclismo, de diseño de embarcaciones e incluso en diseño de ropa de baño de alta competición,(Orrego, 2009).

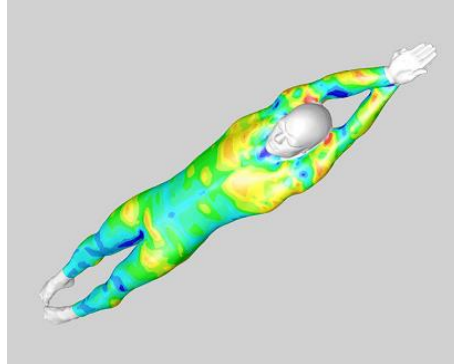


Figura 1.12. Resultados de simulación CFD a un nadador (Presiones).

Ansys Fluent©.

Otro campo de actuación es la ingeniería medioambiental. Los problemas que aborda en este ámbito son la dispersión de contaminantes en diferentes entornos: ciudades, dentro de calles, en complejos industriales. Para ello también calculan los campos de viento y otras variables atmosféricas que caracterizan las distintas situaciones. Incluso se han empleado en situaciones biomédicas donde se ha simulado el flujo sanguíneo por las arterias. Otros problemas a los que son aplicables son a procesos donde se produzcan reacciones químicas como puede ser la combustión en un horno o situaciones de intercambio de masa y calor. Y así se podría seguir enumerando el amplio espectro de campos en los que los softwares de la CFD son de gran utilidad. La figura 1.13 muestra el comportamiento de las corrientes de viento convectivo que se forman en el Valle de Aburra (Medellín, Colombia),(Orrego, 2009).

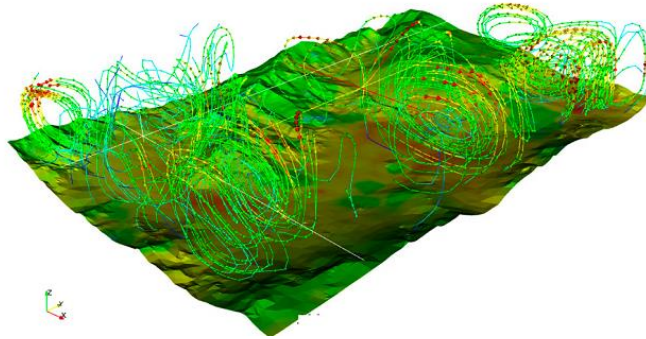


Figura 1.13. Vientos convectivos sobre el Valle de Aburrá. Mecánica Aplicada EAFIT©.

Usando la CFD es posible construir un modelo computacional que represente un sistema o equipo que se quiera estudiar. Después se especifican las condiciones físicas y químicas del fluido al prototipo virtual y el software entregará la predicción de la dinámica del fluido. Por lo tanto, CFD es una técnica de diseño y análisis implementada en el computador. La herramienta CFD ofrece la capacidad de simular flujos de gases, líquidos, transferencia de masa y calor, cuerpos en movimiento, física multi-fases, reacciones químicas, interacción fluido-estructura y acústica a través de la modelación en el computador,(Orrego, 2009). Las posibilidades de aplicación de la CFD a distintos procesos son enormes. Algunos ejemplos son:

1. Sistemas de calefacción, ventilación, climatización y refrigeración.
2. Aeroespacial/Defensa: perfiles de alas, misiles y estudios de aerodinámica externa.
3. Industria agroalimentaria: procesado y envasado de alimentos, diseño de equipos.
4. Industria automoción: aerodinámica, combustión en motores, componentes.
5. Energía: petróleo, gas, nuclear, generación eléctrica, turbo maquinaria, células de combustible.

6. Industria química: combustión, filtración, mezcla, separadores, reactores.
7. Industria electrónica: semiconductores, enfriamiento de elementos.
8. Industria biomédica.
9. Industria naval.
10. Industrias del metal.
11. Industria deportiva: automovilismo, vela, estadios.
12. Medio ambiente.
13. Control de polvos.

1.6.4 Ventajas del CFD.

Si se cuenta con un dispositivo o un diseño de un sistema el cual presenta dificultades de prototipado o de realizar pruebas experimentales para comprobar y verificar su diseño, el uso de la herramienta CFD permite virtualmente conocer el comportamiento del funcionamiento interior. Existen muchos fenómenos que se pueden evidenciar a través de la CFD, que no se pueden apreciar mediante ningún otro método. La CFD ofrece un conocimiento interno más detallado de los diseños, (Orrego, 2009).

Las principales ventajas que tiene el uso de la herramienta CFD son:

- Predice el comportamiento de las propiedades del fluido con gran detalle en el dominio estudiado.
- Ayuda al diseño y al prototipaje y soluciones rápidas evitando costosos experimentos.
- Se obtiene una visualización y animación del proceso en términos de las variables del fluido.

1.6.5 Desventajas de la CFD.

Entre las principales desventajas que se pueden mencionar del uso de estas tecnologías se encuentran las siguientes:

- Requiere usuarios con amplia experiencia y formación especial.
- Consume recursos de hardware y software que requieren inversiones iniciales significativas.

- En algunos casos, el costo computacional es elevado.

1.6.6 Metodología de trabajo del CFD.

Una simulación numérica está compuesta por 3 etapas: pre procesamiento, procesamiento y pos procesamiento. Durante la etapa de pre procesamiento se genera la geometría, el enmallado y configuración de la simulación. Durante la etapa de procesamiento se resuelven numéricamente las ecuaciones fundamentales y la etapa de pos procesamiento está definida por la visualización y análisis de resultados.

Una simulación CFD comienza con la modelación geométrica CAD del dominio a analizar, es decir representar en el computador la geometría de lo que se quiera simular. Este dominio representa el fluido sobre el cual se quiere tener información, analizar y predecir el comportamiento. Actualmente existen diversos softwares comerciales especializados únicamente en generar modelaciones CAD. Algunos de ellos son: Pro Engineer, Catia, Solid Works, Solid Edge, etc.

Una vez se tenga el dominio computacional o modelo CAD del fluido, éste se discretiza o divide espacialmente en celdas para formar una malla o grilla. Las mallas pueden ser regulares, definidos por celdas en formas de triángulos (2D) o en tetraedros (3D), o pueden ser regulares definidos por celdas en formas de cuadrado (2D) o hexaedros (3D). Las propiedades físicas del fluido, tales como temperatura o velocidad, son calculadas en cada uno de estos volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales. Un mayor número de elementos necesita mayor capacidad computacional. La figura 1.14 muestra el resultado de discretización (mallado) de los componentes de una turbina Francis, realizado con un software llamado ICEM CFD, (Orrego, 2009).

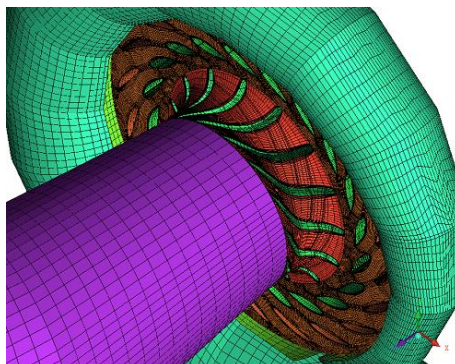


Figura 1.14. Enmallado regular de una turbina Francis. Mecánica Aplicada EAFIT©.

Luego de dividir el modelo geométrico en celdas se procede a generar la configuración de la simulación. Esto significa establecer materiales, velocidades en el contorno de la geometría, modelos adicionales para el análisis, etc,(Orrego, 2009).

Una vez terminada la etapa de pre procesamiento continúa la etapa de solución de las ecuaciones. Los tiempos de cómputo dependen de varios factores: número de elementos, especificaciones del equipo usado, configuración de la simulación. Posterior a la solución se analizan los resultados, se toman decisiones y por lo general se procede a realizar otras simulaciones para evaluar el comportamiento de algún valor en función de la variación de determinados parámetros. La figura 1.15 muestra la comparación de la estela de humo de un incendio, registrado mediante métodos experimentales y numéricos,(Orrego, 2009).

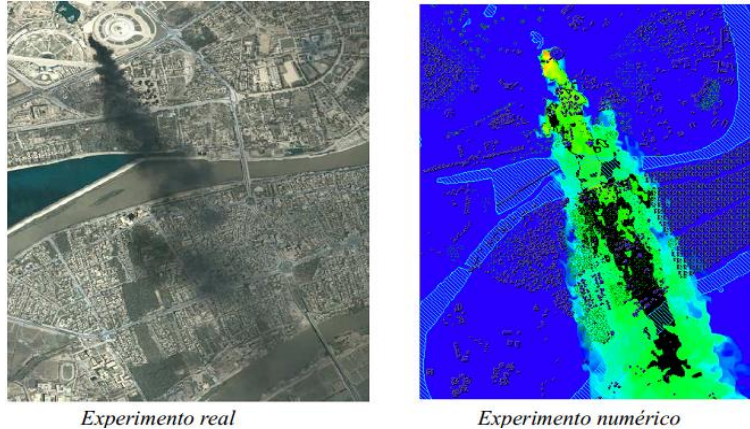


Figura 1.15. Estela de humo. Kuzmin ©.

1.6.7 Programas comerciales.

Actualmente existen varias empresas que se han dedicado a programar y ofrecer software que resuelven problemas de fluidos usando CFD. Algunos de ellos son: Ansys CFX, OpenFOAM (gratis), Ansys Fluent, Star-CD, Flow 3D, Phoenix, etc. La diferencia entre ellos son las capacidades adicionales que tienen, por ejemplo, múltiples modelos de turbulencia, modelos de partículas y contaminantes, componentes rotatorios, etc.; características para resolver problemas muy puntuales.

Además existen códigos especializados únicamente en cada etapa de una simulación. Por ejemplo existen códigos dedicados exclusivamente a mallar dominios: ICEM CFD, Triangle, NetGen, Harpoon, etc. Códigos para visualizar resultados: Paraview, Enight, FieldView, etc.

Como dato curioso, una simulación CFD para predecir el comportamiento de una turbina Francis utilizando supercomputadores (computadores con cientos de procesadores conectados en paralelo) puede tardar meses de cálculo continuo para obtener una solución. A continuación se muestra el resultado de una simulación CFD a un separador ciclónico,(Orrego, 2009).

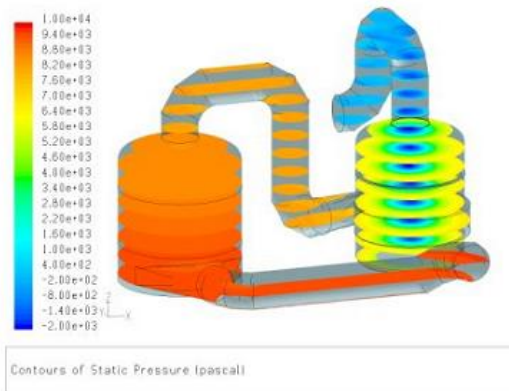


Figura 1.16. Separador ciclónico. CFD.AT ©.

1.6.8 Simulaciones vs. Experimentos – Validación.

Existen una multitud de dificultades que se han de afrontar antes de obtener una buena solución.

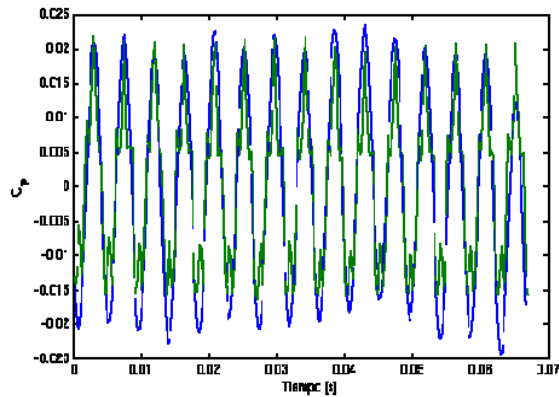
En primer lugar no se puede perder de vista que la solución debe de ser acorde a la realidad. De nada sirve una “bonita” solución si no se aproxima a los experimentos físicos reales. Es por esto que cualquier simulación numérica debe buscar un método de validación experimental y/o analítica. De nada sirve visualizar campos de presiones y velocidades, si los datos plasmados en la respuesta son falsos.

Por esta razón la CFD se conoce jocosamente como Color Fluid Dynamics. Es altamente recomendando que cualquier simulación numérica lleve un proceso de validación y control de calidad de resultados. Esto garantiza la confiabilidad de los datos obtenidos.

La tendencia de la industria mundial al utilizar este tipo de herramientas es utilizar siempre ambos métodos de diseño, pruebas experimentales y simulaciones numéricas; las pruebas experimentales necesitan de simulaciones numéricas y viceversa, obteniendo los mismos resultados.

Comparaciones de aplicaciones industriales manifiestan que se alcanzan porcentajes de error hasta de 10%; un valor bastante aceptado a la hora de diseñar y proponer procesos de optimización. La figura 1.17 muestra un gráfico de presión vs tiempo para un punto espacial de una turbina Francis. Se realizó una

simulación de su comportamiento y se halló la presión en determinado lugar. Adicional a esto se hizo una medición de presión en situ y se obtuvo su valor. Ambos datos se compararon. Se puede ver la gran concordancia de datos,(Orrego, 2009).



Azul experimental – Verde numérico

Figura 1.17. Comparación de datos experimentales y numéricos. Mecánica Aplicada EAFIT©.

Una vez el modelo la CFD es validado (calibrado) mediante cualquier método es posible entonces reproducir cualquier escenario requerido para los diseñadores o analistas. Esto aumenta el espectro de soluciones requeridas, de una manera más económica que implementar un banco experimental avanzado,(Orrego, 2009).

1.6.9 Actualidad.

El gran talón de Aquiles del CFD es la generación de las mallas, debido a las complejas geometrías que pueden tener los sistemas a analizar. Es por esto que actualmente se están desarrollando métodos numéricos para la solución de Navier-Stokes que no requieren enmallado, pues son basados en otros principios. Algunos de ellos son: Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), Spectral methods, Lattice Boltzmann methods. A continuación se muestra una imagen que contienen resultados de estas simulaciones,(Orrego, 2009).

1.7 Método de elementos finitos.

El método de elementos finitos se ha impuesto para la mayoría de los casos prácticos. A partir de su consolidación en el área de Mecánica de Sólidos, el método se extendió a otras áreas de la física, tales como la mecánica de fluidos, la transferencia de masa y calor, el electromagnetismo,(DIN, 1992).

El análisis de elementos finitos, permite la construcción de diseños enteros, su refinación y la optimización de éstos antes de que el diseño sea manufacturado. Esta poderosa herramienta de diseño ha mejorado en gran forma, ambos, el estándar de diseños en ingeniería y la metrología del proceso del diseño en muchas aplicaciones industriales. La introducción del análisis de elementos finitos ha reducido el tiempo que se toma para llevar productos desde el concepto hasta la línea de producción. A través de la mejora de diseños de prototipos iniciales usando el análisis de elementos finitos se han acelerado, principalmente, las pruebas y el desarrollo. En resumen, los beneficios del análisis de elementos finitos son: una alta precisión, diseño mejorado, y una mejor percepción de los parámetros críticos de diseño, prototipos virtuales, menos prototipos de hardware, y ciclo de diseño más rápido y económico, alza en la productividad y en las ganancias.(Ciofalo, et al., 1995)

Según (DIN, 1992) , el desarrollo y obtención de estructuras formadas por piezas constituye una de las partes más importantes en el trabajo de ingenieros y arquitectos. Las tareas de desarrollo de la estructura de las piezas están indisolublemente vinculadas con el desarrollo técnico de las máquinas en general. Debe entenderse como estructura la parte de una construcción o artefacto mecánico, encargada de mantener su forma ante acciones exteriores de todo tipo (fuerzas, variaciones de temperatura, movimientos impuestos, etc.).

Debido a las pulsaciones de la presión a las que se encuentra sometido el conjunto de agitación las mismas sufren deformaciones en su estructura o roturas frecuentes, estas cargas constituyen un factor muy dañino en cuanto a fiabilidad y resistencia de las aletas y, por consiguiente, influyen directamente en la productividad y vida útil del equipo.

El objetivo de este epígrafe es comprobar la resistencia del agitador, que se diseña en la investigación. El cálculo será realizado aplicando técnicas modernas de análisis y simulación por el Método de los Elementos Finitos (MEF). En esta parte se obtienen las tensiones máximas que se producen sobre el agitador, se realiza el análisis estático lineal empleando el paquete gráfico SolidWorks en el diseño 3D del mismo.

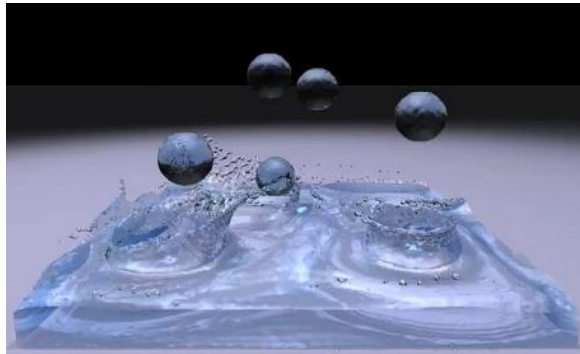


Figura 1.18. SPH method. Harada ©.

1.8 Flow Simulation.

1.8.1 Capacidades de Flow Simulation.

Flow Simulation, (SolidWorks, 2013), se basa en avanzadas técnicas de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite analizar una amplia gama de flujos complejos con las siguientes características:

- Análisis en dos y tres dimensiones.
- Flujos externos e internos.
- Flujos en estado estacionario y transitorio.
- Líquido incompresible y flujos de gas compresible, incluyendo los regímenes subsónico, sónico y supersónico.
- Líquidos no newtonianos.
- Líquidos compresibles * (densidad del líquido depende de la presión).
- Flujos laminares y turbulentos.
- Remolinos y ventiladores.
- Flujos de mezclas.

- Flujos con transferencia de calor dentro y entre los líquidos y sólidos (transferencia de calor conjugada) * Versión Professional.
- Radiación de superficie a superficie * (incluyendo la calefacción solar).
- Flujo con efectos gravitacionales (también conocido como los efectos de empuje).
- Medios porosos.
- Flujos con gotas de líquido o partículas sólidas.
- Paredes con rugosidad.
- Movimiento tangencial en las paredes * (traslación y rotación).

1.8.2 Ecuaciones rectoras del movimiento de fluidos.

Flow Simulation resuelve la totalidad de las ecuaciones de Navier-Stokes estas ecuaciones se complementan con ecuaciones del estado líquido que definen la naturaleza del fluido, y por las leyes empíricas de la dependencia de la viscosidad y la conductividad térmica con otros parámetros del fluido.

- Se cumplen las ecuaciones de conservación.
- Conservación de la masa (ecuación de continuidad).
- La segunda ley de Newton del movimiento (ecuación del momento).
- La primera ley de la termodinámica (ecuación de conservación de la energía).
- Ecuaciones de transporte se utilizan para la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación (modelo k-e).

1.8.3 Flow Simulation teoría de fondo.

Flow Simulation resuelve las ecuaciones que rigen el fluido usando el método de los volúmenes finitos (FV) en lugar del método de elementos finitos.

En una malla computacional espacial rectangular diseñada en el sistema de coordenadas cartesianas. Con los planos ortogonales a los ejes y refinado localmente en la interfaz sólido/líquido. Y, si es necesario, además, en las regiones líquidas especificadas, en las interfaces sólido/sólido y en la región líquida durante el cálculo.

Los valores de todas las variables físicas se almacenan en los centros de la malla. Las ecuaciones que gobiernan el flujo son discretizadas en forma conservativa. Las derivadas espaciales se aproximan con operadores de diferenciación implícita de segundo orden de exactitud.

Se utiliza un modelo laminar/turbulento para describir los flujos de capa límite de las regiones cerca de la pared. El modelo se basa en el llamado enfoque Modificado de las Funciones de la Pared.

Este modelo se emplea para caracterizar flujos laminares y turbulentos cerca de las paredes, y para describir la transición de flujo laminar a turbulento, y viceversa.

1.8.4 Pasos para el análisis con el módulo Flow Simulation.

Crear el diseño en SolidWorks.

- Flow Simulation puede analizar piezas, conjuntos, subconjuntos y multicuerpos.
- Crear un archivo de proyecto Flow Simulation.
- Usar el Asistente de Flow Simulation para crear archivo de proyecto.

1.8.5 El proyecto de Flow Simulation.

Cada proyecto Flow Simulation se asocia con una configuración de SolidWorks. Mediante la modificación del proyecto de Flow Simulation se puede analizar el flujo bajo diferentes condiciones y para modelos modificados de SolidWorks. Cuando se crea un proyecto aparece a la derecha de la ficha Administrador de configuración de SolidWorks una nueva ficha de diseño Árbol Flow Simulation. Puede utilizar el gestor de diseño del Flow Simulation para especificar los datos restantes del proyecto, tales como condiciones de contorno, condiciones iniciales, las fuentes de calor, las condiciones materiales y objetivos.

➤ Para crear un proyecto, debe definir lo siguiente:

- El nombre del proyecto.
- Un sistema de unidades.
- Un tipo de análisis (externo o interno).
- El tipo de fluido (gas, líquido incompresible, líquido laminar no newtonianos o líquidos compresibles).

- Para crear un proyecto, también se debe definir lo siguiente (si procede):
- Las sustancias (líquidos y sólidos).
 - Las condiciones iniciales y ambientales.
 - La resolución de la geometría y la resolución de los resultados.
 - Un valor de rugosidad de la pared.
 - Las características físicas incluyen la transferencia de calor en los sólidos, efectos de grandes números de Mach para flujo de gas, los efectos gravitatorios, efecto del tiempo, radiación de superficie a superficie y si el flujo es laminar solamente.
 - Condiciones por defecto de la pared, por ejemplo, pared adiabática, si la transferencia de calor en los sólidos no se considera.
 - Condiciones térmicas por defecto de la pared exterior en caso de un análisis interno con transferencia de calor.
 - Condiciones de radiación por defecto de la pared en el caso de radiación superficie-superficie

Condiciones de frontera en la pared.

Las condiciones de contorno de la velocidad por defecto en las paredes sólidas se corresponde con la condición de no deslizamiento (velocidad tiende a cero en la pared). La condición "Pared Ideal" también está disponible. Por ejemplo, paredes ideales se pueden utilizar para modelar planos de simetría del flujo.

Simulación a través del Flow Simulation.

Flow Simulation discretiza las ecuaciones dependientes del tiempo de Navier-Stokes y las resuelve en la malla computacional.

Bajo ciertas condiciones, para mejorar las características de la solución, Flow Simulation automáticamente refina la malla computacional durante el cálculo del fluido.

Como Flow Simulation resuelve el estado de equilibrio mediante la resolución de problemas mediante ecuaciones en función del tiempo, Flow Simulation tiene que decidir cuándo una solución de estado estacionario se obtiene (es decir, la

solución converge), por lo que el cálculo se puede detener Flow Simulation ofrece una gama de condiciones diferentes para terminar el cálculo.

Resultados de Flow Simulation.

- Gráficos de resultados (Cualitativos).
 - Vectores, curvas de nivel, isolíneas.
 - Gráficos de corte, de superficie, trayectorias de flujo, isosuperficies.
 - Resultados procesados (Cuantitativos).
 - Excel.
 - Parámetros de Gráficos X-Y (Excel).
 - Objetivos (la superficie).
 - Parámetros de los puntos.
 - Informes.
 - Temperatura de referencia del fluido.

1.9 Estado actual de las investigaciones en agitadores de fluidos industriales.

El estudio detallado de la hidrodinámica en este sistema de agitación es fundamental para continuar obteniendo conocimientos básicos imprescindibles para la síntesis y la modelación matemática de diferentes procesos complejos que se llevan a cabo en los tanques agitados.

Existe una gran diversidad de posibles configuraciones geométricas a implementar en los reactores tipo tanque agitado, teniendo en cuenta que la geometría óptima del reactor para implementar un proceso determinado en el mismo depende del proceso que se va a llevar a cabo (Guha, 2007).

Diferentes aspectos de la modelación de la hidrodinámica en reactores tipo tanque agitado son abordados por, (Ameur & Bouzit, 2012; Ascanio, 2012; Aubin, Fletcher, & Xuereb, 2004; Aubin & Xuereb, 2006; Duany, 2013; Guha, 2007; Kubicki & Simon, 2012; Martín, 2008; Martínez, 2010; Matthias & Rasmuson, 2012; Rao & Sivashanmugam, 2010; Shitanshu, 2012; Wadnerkar, 2012). Los patrones de flujo en el volumen del tanque agitado han sido abordados en los trabajos de; (Bahl, Gely, & Pagano, 2012; Medina, 2007). Los parámetros del

tanque han sido investigados en los últimos años por; (Ascanio, 2012; Aubin & Xuereb, 2006; Bahl, et al., 2012). Ver figura 1.19.

Los temas relacionados con el consumo de potencia en tanques agitados resultan de vital interés para la determinación de los parámetros de diseño del agitador, entre los trabajos recientes relacionados con este aspecto se encuentran los de; (Ameur & Bouzit, 2012; Hickman, 1985; Taghavi, 2011; Thakur, 2004; Yapici, 2003). Aspectos relacionados con los software de CFD se tratan en; (Ascanio, 2012; Rao & Sivashanmugam, 2010).

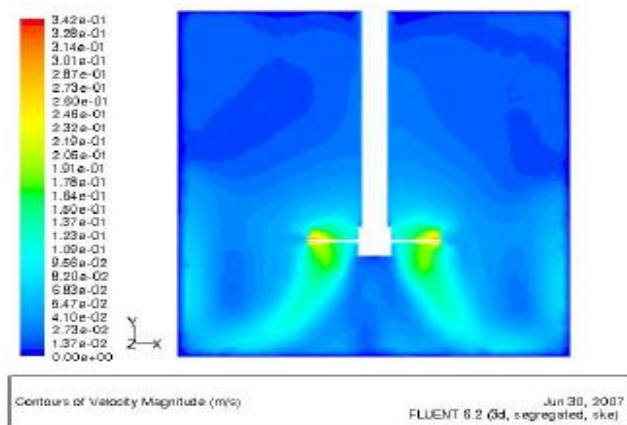


Figura 1.19. Contorno de velocidades para la simulación en MRF (60 rpm).

1.10 Instalación semi-industrial de hidrot transporte del ISMM.

La instalación semi-industrial de hidrot transporte de ISMM como se muestra en las figuras 1.20 y 1.21 es un sistema de tuberías cerrado o de descarga directa en el tanque, la misma está compuesta de una línea de tuberías principal de diámetro 100 mm, y dos secciones paralelas de 150 y 78 mm respectivamente, la longitud de tubería es de 75 m, la mismas consta de 14 codos de 90 grados DN100 RST en la línea central, 2 codos DN150 de 90 grado en la tubería que cierra el circuito, 7 válvula de compuerta DN100 emplantillada clase 150 lb y 3 válvulas de la misma clase y denominación DN150 en la tubería trasera y en la salida del tanque, 4 válvulas de compuerta DN60 y tres válvulas de bola DN 32, 6 reducidos

Capítulo I

entre concéntrico y excéntricos, 12 acoplamientos de platillos. Se consta de dos bombas, la bomba 1 con una capacidad de 160 m³/h y potencia del motor de 55 kW y la bomba 2 con una capacidad de 60 m³/h y potencia del motor 20 kW instaladas en paralelo y trabajan solo una a la vez.

Estas bombas succionan de un tanque cilíndrico de fondo cónico de una capacidad volumétrica de 5,20 m³. En el interior del tanque y de forma centrada, se encuentra un sedimentador mecánico acoplado a un moto-reductor como muestra la figura 1.20 con el objetivo de impedir la sedimentación de las pulpas a tratar.

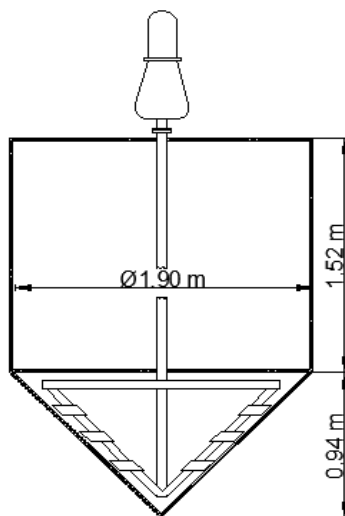


Figura 1.20. Esquema del tanque de la instalación semi-industrial con sedimentador.

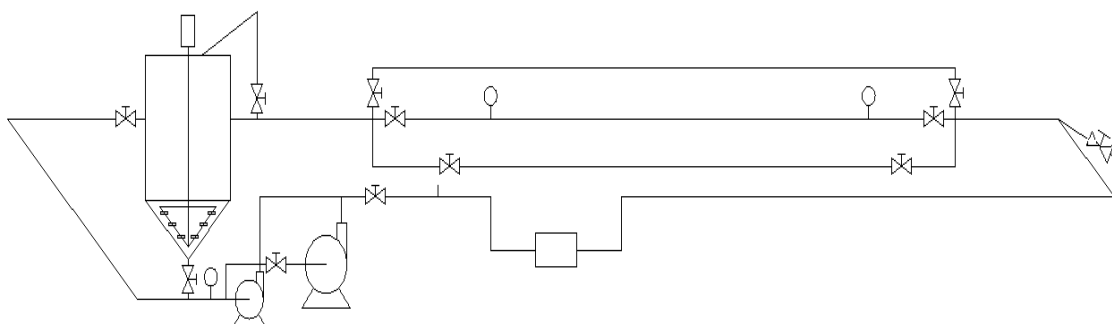


Figura 1.21. Esquema de la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM.

CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE AGITACIÓN DE LA INSTALACIÓN SEMI-INDUSTRIAL DEL ISMM DE MOA.

En la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM se consta con un sistema de redes de tuberías dispuestas en serie y en paralelo, cerrado o de descarga directa en el tanque con el objetivo de estudiar varios fluidos en movimiento, dicho fluido es la mezcla de cieno carbonatado con agua, para el desarrollo de dicho proceso partimos del tanque que se encuentra en dicha instalación compuesto por un sedimentador (figura 2.1), la función que está ejerciendo el mismo es limpiar el cono del tanque a través de los brazos de arrastre, desplazándose a una velocidad constante dentro de la masa de cieno que descansa en el fondo del tanque, pues la sedimentación es una operación unitaria consistente en la separación por la acción de la gravedad de las fases sólida y líquida, de una suspensión diluida para obtener una suspensión concentrada y un líquido claro. Apreciándose que el sedimentador no cumple con los objetivos propuestos para lograr una correcta homogenización en el tanque que se encuentra situado en dicha instalación, siendo este el objetivo de nuestro trabajo.

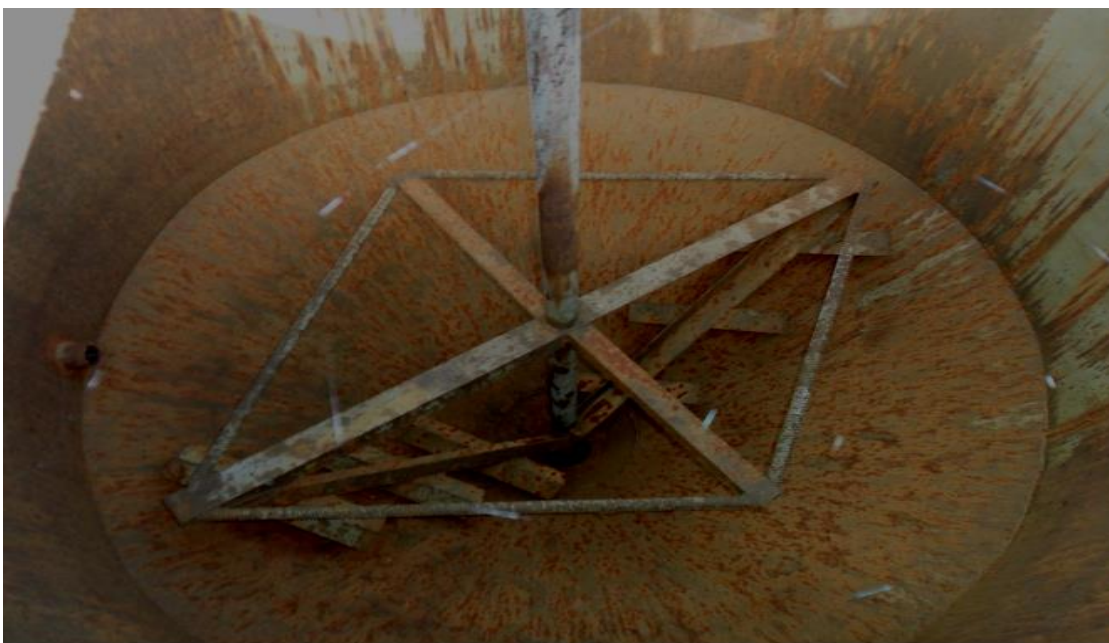


Figura. 2.1. Sedimentador que se encuentra en la instalación del ISMM.

En el tanque de dicha instalación lo que se necesita es un agitador que garantice una distribución uniforme de dos componentes entre sí por medio del flujo, dicho flujo es producido por influencias mecánicas generalmente cuando se mezclan líquidos miscibles o sólidos en líquidos, esta operación se puede lograr realizando movimientos violentos e irregulares en el seno de una masa fluida o que se comporte como tal para la homogenización del fluido, es decir, mantener la concentración constante en todas las partes de la masa o alrededor del tanque, por lo que se requiere de una propuesta de diseño de un agitador que cumpla con todos los requisitos antes planteado para su uso en la instalación.

2.1 Procedimiento para el diseño del sistema de agitación de la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa bajo criterios técnico-económicos.

1. Definir los parámetros dimensionales del sistema mecánico de agitación.
2. Establecer a través de la Tecnología de Grupo una codificación para la comprensión de las variantes de diseño.
3. Modelar los parámetros tridimensionales de los componentes del tanque de lodo con herramientas CAD.
4. Realizar la simulación de la influencia de los cambios dimensionales del conjunto de agitación en la homogenización del lodo con herramientas CAE.
5. Proceso de toma de decisiones teniendo en cuenta la homogenización del fluido no newtoniano y el impacto energético.
6. Análisis tensional del agitador por el método de elementos finitos.
7. Elaboración de la documentación técnica requerida.

2.2 Cálculo de los parámetros dimensionales del sistema mecánico de agitación.

A raíz de la problemática que presenta la instalación se propone el diseño de un agitador que cumpla con los objetivos planteados: lograr una adecuada velocidad promedio del fluido que garantice la homogenización con el menor impacto energético.

2.2.1 Configuración del tanque.

Determinación del volumen y la altura de trabajo en el tanque:

Cálculo del volumen de trabajo.

$$V_T = V_C + V_F \quad (2.1)$$

Dónde:

V_C - volumen de la sección cilíndrica (m).

V_F - volumen de la sección cónica (m).

$$V_C = \pi \cdot r^2 \cdot h_C \quad (2.2)$$

$$V_F = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot h_F}{3} \quad (2.3)$$

Dónde:

r- radio del cilindro (m).

h_C - altura del líquido sección cilíndrica (m).

h_F - altura de la sección del cónica (m).

Altura de trabajo

$$H_T = h_C + h_F \quad (2.4)$$

2.2.2 Configuración del agitador propuesto.

Se empleará una turbina con 4 palas inclinadas a 60° , pues este tipo de agitador puede operar en un rango amplio de viscosidades del líquido que se desea agitar y su construcción es bastante sencilla. En base al diámetro del tanque se dimensionará el agitador siguiendo la siguiente tabla de proporciones estandarizadas según la norma DIN 28131. Suarez (2011).

Capítulo II

Tabla 2. Proporciones estandarizadas según la norma DIN 28131.		
$\frac{D_a}{D_t} = (0.2 - 0.5)$	$\frac{H_t}{D_t} = (0.5 - 1)$	$\frac{C}{D_t} = (0.17 - 0.34)$
$\frac{W}{D_a} = 0.177$	$\frac{L}{D_a} = 0.25$	$\frac{D_d}{D_a} = 0.66$

Los líquidos se agitan con más frecuencia en tanques o recipientes, generalmente de forma cilíndrica y provista de un eje vertical. La parte superior del recipiente puede estar abierta al aire o cerrada. Las proporciones del tanque varían bastante dependiendo de la naturaleza del problema de agitación. Sin embargo, en muchas situaciones se utiliza un diseño estandarizado como el que se muestra en la figura 2.2. El fondo del tanque es redondeado y no plano, con el fin de eliminar los rincones escarpados o regiones en las que no penetrarían las corrientes de fluido. La altura del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque. El rodete va instalado sobre un eje suspendido, es decir, un eje soportado en la parte superior. El eje está accionado por un motor, a veces directamente conectado al eje, pero más frecuentemente acoplado al eje a través de una caja reductora de velocidad o motoreductor.

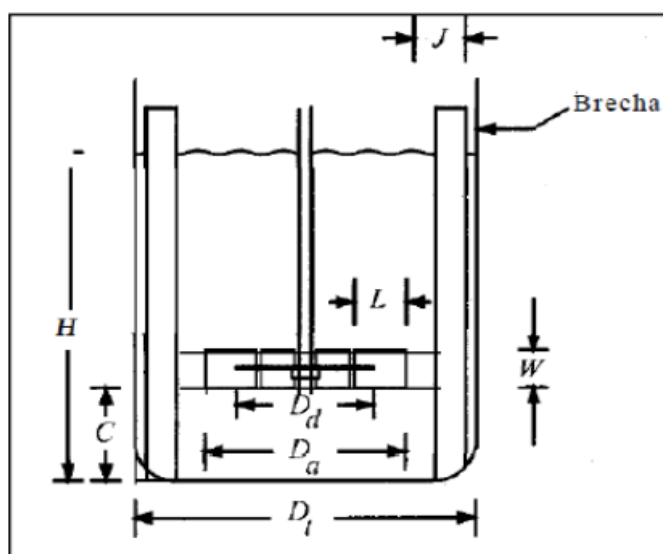


Figura. 2.2. Tanque típico de proceso con agitación según la norma DIN 28131.

Capítulo II

Teniendo en cuenta que:

$$D_a = (0.2 - 0.5) \cdot D_t \quad (2.5)$$

$$H_t = (0.5 - 1) \cdot D_t \quad (2.6)$$

$$C = (0.17 - 0.34) \cdot D_t \quad (2.7)$$

$$W = 0.177 \cdot D_a \quad (2.8)$$

$$L = 0.177 \cdot D_a \quad (2.9)$$

$$D_d = 0.66 \cdot D_a \quad (2.10)$$

$$E_r = 0.1 \cdot L \quad (2.11)$$

La utilización de tabiques deflectores da como resultado una gran circulación desde la parte superior al fondo del recipiente, sin que se formen vórtices ni se ejerzan tensiones no balanceadas del flujo sobre el eje de impulsión, como se muestra en las figuras (1.7 y 1.8). Los deflectores se calculan mediante la siguiente ecuación.

$$J = 0.0833 \cdot D_t \quad (2.12)$$

Dónde:

D_a : Diámetro del agitador (m)

D_t : Diámetro del tanque (m)

H_t : Altura de trabajo (m)

C : Altura del agitador (m)

W : Ancho de la paleta (m)

L : Longitud de la pala (m)

D_d : Diámetro del disco (m)

J : Ancho de los deflectores (m)

E_r : Espesor del rodete (m)

El número de placas deflectoras es generalmente de 4; el número de palas del agitador varía entre 4 y 16, pero generalmente es de 4, 6 u 8. En situaciones especiales se pueden aconsejar proporciones diferentes de las

que se acaban de indicar; por ejemplo, puede resultar ventajoso colocar el agitador más alto o más bajo en el tanque, o bien puede ser necesario utilizar un tanque más profundo para alcanzar el resultado apetecido. Con todas las proporciones estándar antes relacionadas son ampliamente aceptadas y en ellas se basan muchas de las correlaciones publicadas sobre el funcionamiento de agitadores.

2.3 Codificación a través de tecnología de grupo.

La tecnología de grupo es una herramienta que proporciona una correcta organización de un gran grupo de datos lo que facilita su utilización para una mejor comprensión de los mismos. A continuación se establece una codificación para la mejor comprensión de las variantes de diseño partiendo de datos específicos como en este caso sería; la altura del agitador, el diámetro del mismo y la presencia o no de deflectores en el tanque, C-Da-D.

Donde:

C: Altura de agitador

Da: Diámetro del agitador

D: Presencia de deflectores

Ejemplo: 323-380-0

A partir de la codificación concebida se logró organizar la información referente a cada una de las variantes analizadas. (Ver anexo 2)

2.4 Cálculo de la potencia consumida.

El número de Reynolds representa una medida de la magnitud relativa de los esfuerzos inerciales con respecto a los esfuerzos viscosos. Si los esfuerzos inerciales dominan respecto a los esfuerzos viscosos se dice que el flujo no puede ser laminar. La pérdida de laminaridad se le denomina simplemente turbulencia. La bibliografía no suele coincidir exactamente en el valor de los límites que separan cada uno de estos regímenes, así que a groso modo se

Capítulo II

expone una clasificación aproximada que es válida para flujos creados por el funcionamiento de turbinas dentro de depósitos:

- Régimen laminar: $Re \leq 100$
- Régimen transitorio: $100 < Re \leq 10000$
- Régimen turbulento: $Re > 10000$

Por lo tanto el número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \quad (2.13)$$

Dónde:

Re - Número de Reynolds

D_a - Diámetro del agitador (m)

N - Revoluciones por minutos (rpm)

ρ - Densidad (kg/m^3)

μ - Viscosidad ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

La potencia es un número adimensional que indica en cierta forma la potencia que utiliza el agitador y permite comparar este valor con los de otros tipos de agitadores.

$$P = K_T \cdot N^3 \cdot D_a^5 \cdot \rho \quad (2.14)$$

Es necesario tener el valor de K_T , esta se busca en tabla de acuerdo al tipo de flujo con el que se esté trabajando (K_L -laminar y K_T -turbulento), el tipo de agitador empleado y el número de palas. (Ver en Anexo 1).

Para evitar un sobrecalentamiento del motor se debe trabajar con un factor de seguridad, que generalmente es decidido por el personal de diseño, el factor de seguridad del 30% indica un sistema completamente seguro, el 20% indica un sistema medianamente seguro y el 10% indica un sistema de protección bajo según, (Suarez & Trujillo, 2011).

Entonces se tiene la siguiente ecuación:

$$P_c = (r_s \cdot P) + P \quad (2.15)$$

Dónde:

P_c - Potencia corregida

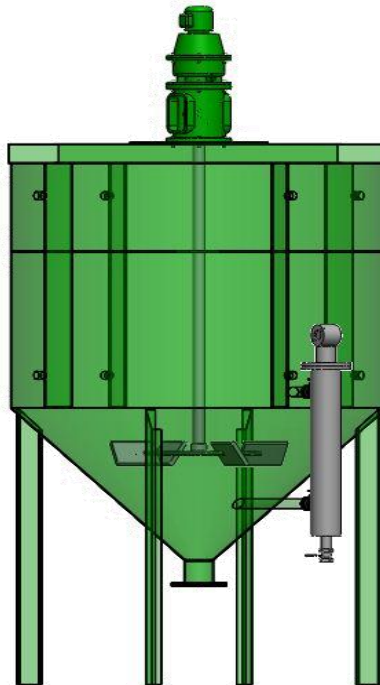
r_s - factor de seguridad

2.5 Modelación en 3D del sistema de agitación utilizando Solid Works.

En la primera etapa se realiza la modelación geometría del sistema de agitación, donde se tiene en cuenta los parámetros dimensionales del agitador y el tanque, los cuales se toman como referencia para las condiciones de frontera. Nótese que se trata de un tanque cónico con un volumen de 5.20 m^3 .

El mismo está compuesto por las siguientes piezas: (Ver figura 2.3).

- Moto reductor
- Agitador
- Deflectores
- Tanque
- Densímetro



Capítulo II

Figura 2.3. Geometría utilizada para la simulación.

Datos de entrada:

Diámetro del tanque (D_t): 1900 mm

Análisis de las dimensiones principales a partir de los datos de entrada:

Tabla 3 Rango de las dimensiones de los parámetros geométricos.		
Parámetros geométricos	Dimensión (mm) diseño	
	máximo	Mínimo
Diámetro del agitador (D_a)	950	380
Altura del agitador al fondo (C)	646	323
Altura de trabajo del lodo (Ht)	1900	950
Longitud de la paleta	237.5	95
Ancho de la paleta	168.15	67.26
Diámetro del disco	627	250.8

2.6 Análisis del proceso de agitación con el módulo Flow Simulation.

PASO 1: Crear un proyecto en Flow Simulation: Al crear un nuevo proyecto automáticamente se crea el dominio computacional. Este dominio representa el fluido sobre el cual se quiere tener información, analizar y predecir el comportamiento.

Una vez se tenga el dominio computacional o modelo CAD del fluido, éste se discretiza o divide espacialmente en celdas para formar una malla o grilla. Las mallas pueden ser regulares, definidos por celdas en formas de triángulos (2D) o en tetraedros (3D), o pueden ser regulares definidos por celdas en formas de cuadrado (2D) o hexaedros (3D). Las propiedades físicas del fluido, tales como temperatura o velocidad, son calculadas en cada uno de estos

volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales. Un mayor número de elementos necesita mayor capacidad computacional.

(Ver figura 2.4)

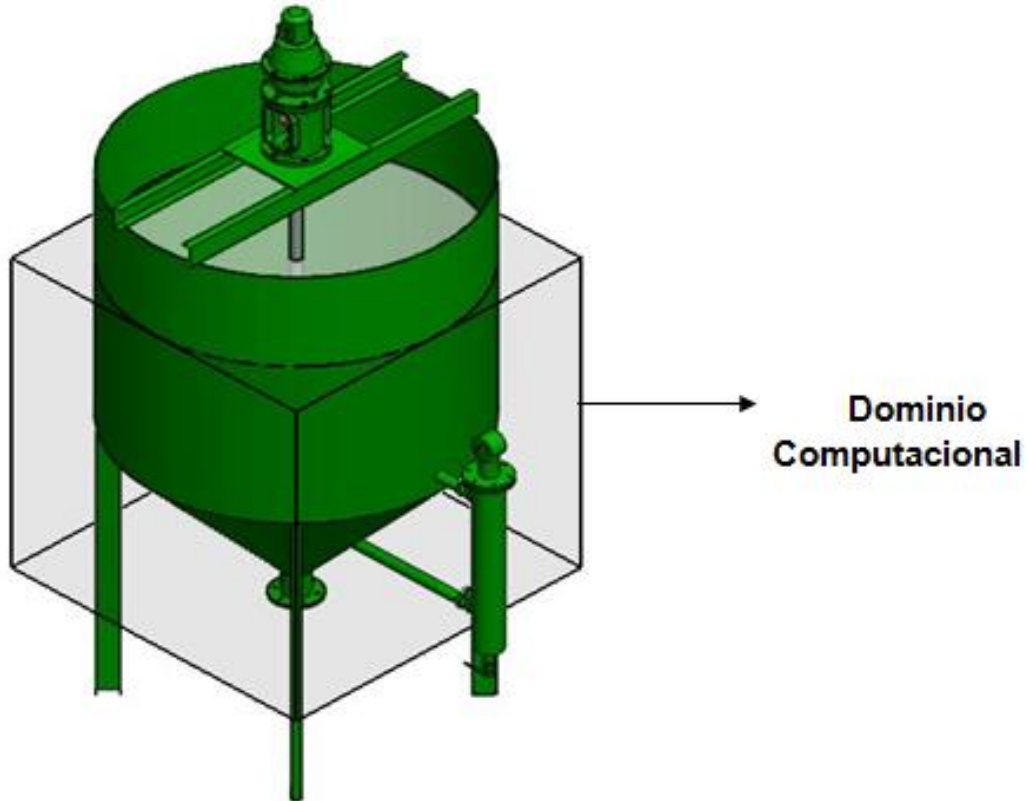


Figura 2.4. Dominio Computacional.

PASO 2: Condiciones de Fronteras (Boundary Conditions). Luego de dividir el modelo geométrico en celdas se procede a generar la configuración de la simulación. Esto significa establecer materiales, velocidades en el contorno de la geometría, modelos adicionales para el análisis.

Se fijan las condiciones de frontera, en este caso la presión que actúa sobre el fluido y la velocidad angular con la que rota el agitador. La presión la cual actúa sobre el fluido es la atmosférica pues el tanque no posee tapa y la velocidad angular con la que rota el agitador es 106 rpm. (Ver figura 2.5 y 2.6)

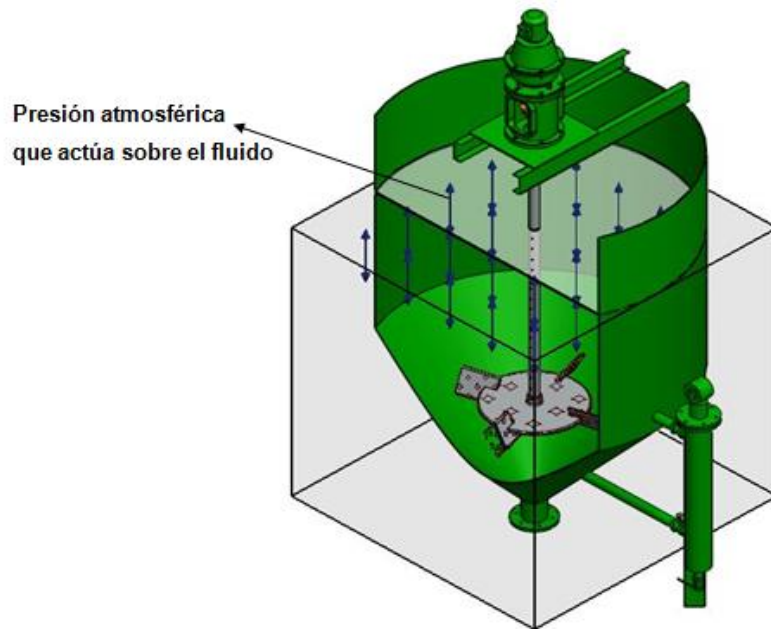


Figura 2.5 Condiciones de frontera.

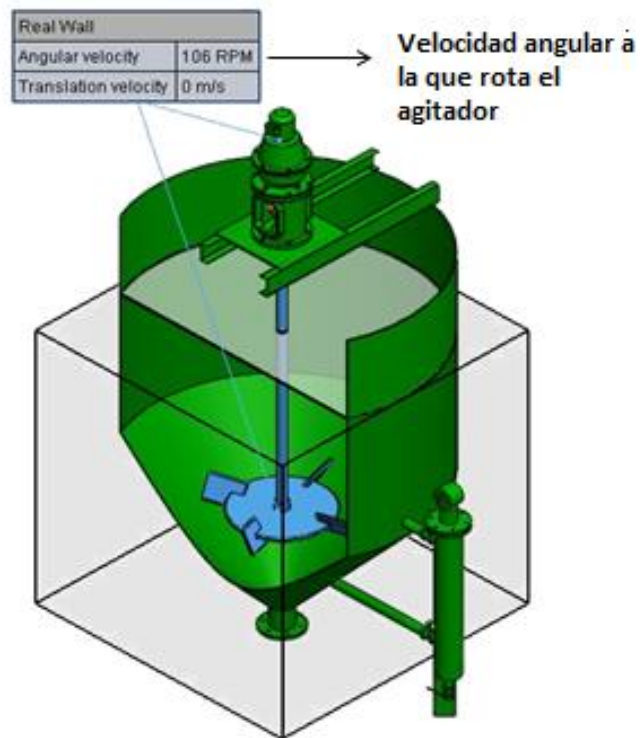


Figura 2.6 Condiciones de frontera.

PASO 3: Definir las metas de Ingeniería (Goal): .Se fijan los parámetros de velocidad y presión total indispensables para la realización de este estudio. (Ver figura 2.7)

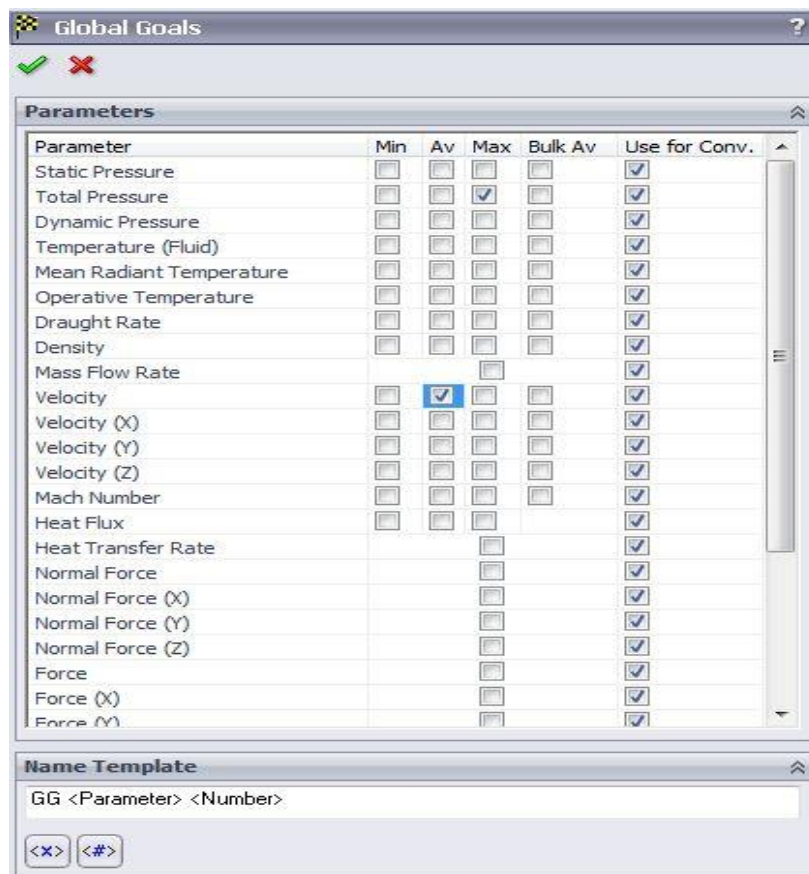


Figura 2.7. Selección de los parámetros globales de presión total y velocidad.

PASO 4: Análisis de los resultados.

2.7 Análisis de las velocidades en función del diámetro del agitador.

Para el estudio de las velocidades de las variantes se realizaron 32 estudios los cuales se dividieron en dos grupos: tanque sin deflectores y tanque con deflectores.

2.7.1 Análisis de las velocidades de las variantes sin deflectores.

Para la realización de estos estudios se escogieron cuatro valores del rango permisible para la determinación de la altura del agitador al fondo del tanque (C). Igualmente se realizó la misma operación con el rango determinado para

Capítulo II

el cálculo del diámetro del agitador (D_a). (Ver ecuación 2.5 y 2.7). Dando como resultado las 16 variantes mostradas en la tabla 4.

Tabla 4. Resultado del análisis de las variantes propuestas sin deflectores.

Variantes	Código	Rango	C1(mm)	Rango	Da(mm)	Da(m)	Vav 1(m/s)
1	323-380-0	0,17	323	0,2	380	0,38	0,012
2	323-570-0	0,17	323	0,3	570	0,57	0,021
3	323-760-0	0,17	323	0,4	760	0,76	-
4	323-950-0	0,17	323	0,5	950	0,95	-
5	418-380-0	0,22	418	0,2	380	0,38	0,021
6	418-570-0	0,22	418	0,3	570	0,57	0,04
7	418-760-0	0,22	418	0,4	760	0,76	0,021
8	418-950-0	0,22	418	0,5	950	0,95	-
9	532-380-0	0,28	532	0,2	380	0,38	0,064
10	532-570-0	0,28	532	0,3	570	0,57	0,025
11	532-760-0	0,28	532	0,4	760	0,76	0,07
12	532-950-0	0,28	532	0,5	950	0,95	0,031
13	646-380-0	0,34	646	0,2	380	0,38	0,095
14	646-570-0	0,34	646	0,3	570	0,57	0,069
15	646-760-0	0,34	646	0,4	760	0,76	0,036
16	646-950-0	0,34	646	0,5	950	0,95	0,062

Como se muestra en el siguiente gráfico existe una relación directa entre el incremento de la velocidad en función del diámetro del agitador para un valor de $C=323$. En el caso de $C=418$ la relación que existe no es proporcional ya que se pueden observar incremento y decrecimiento de la velocidad en función del diámetro del agitador así como para $C=532$ y $C=646$.

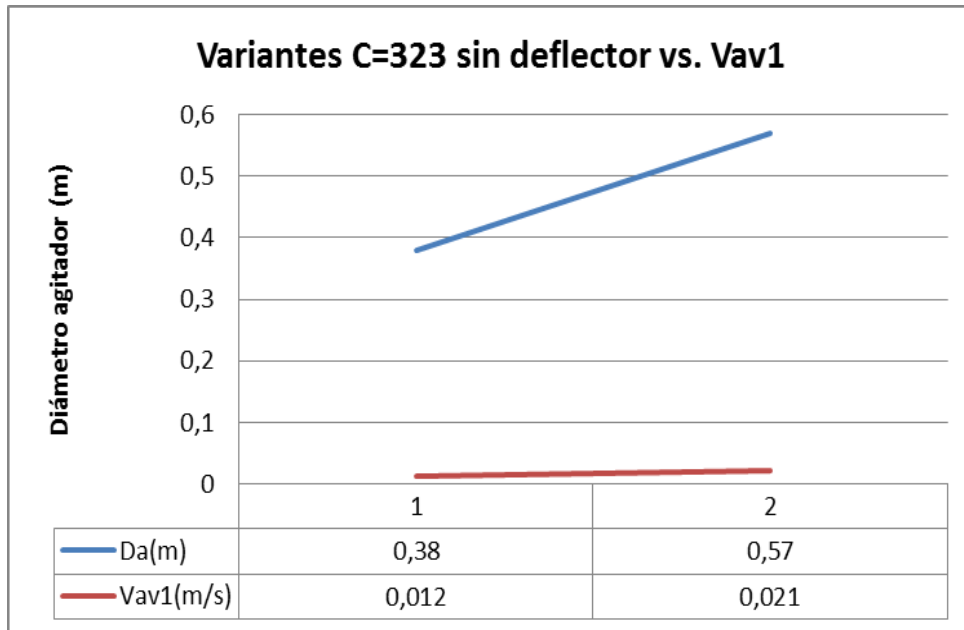


Figura 2.8 Resultados del análisis de las velocidades variantes C=323.

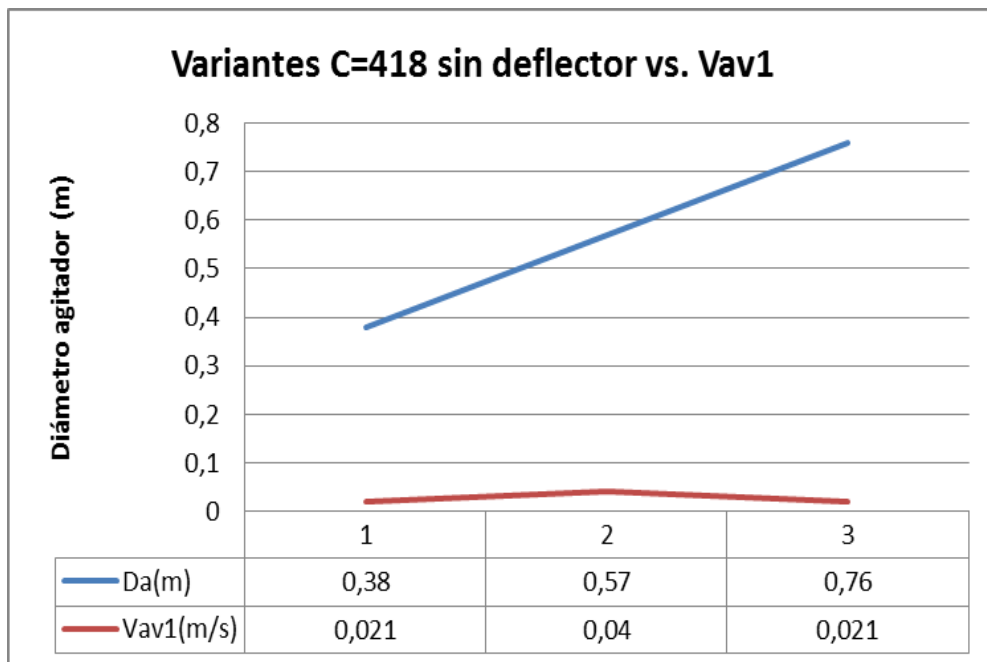


Figura 2.9 Resultados del análisis de las velocidades variantes C=418.

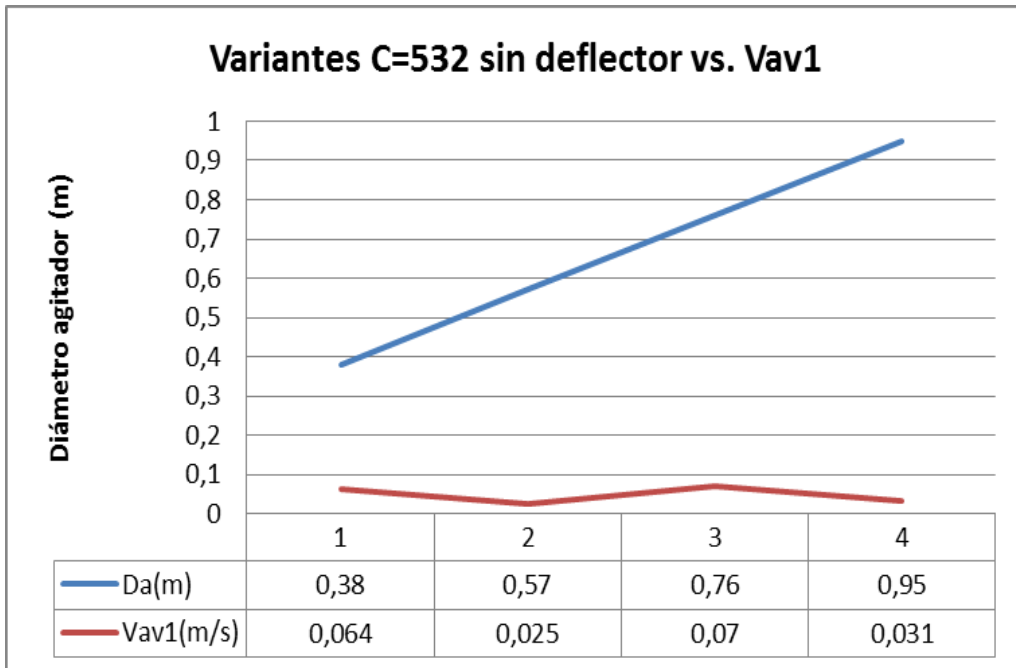


Figura 2.10 Resultados del análisis de las velocidades variantes C=532.

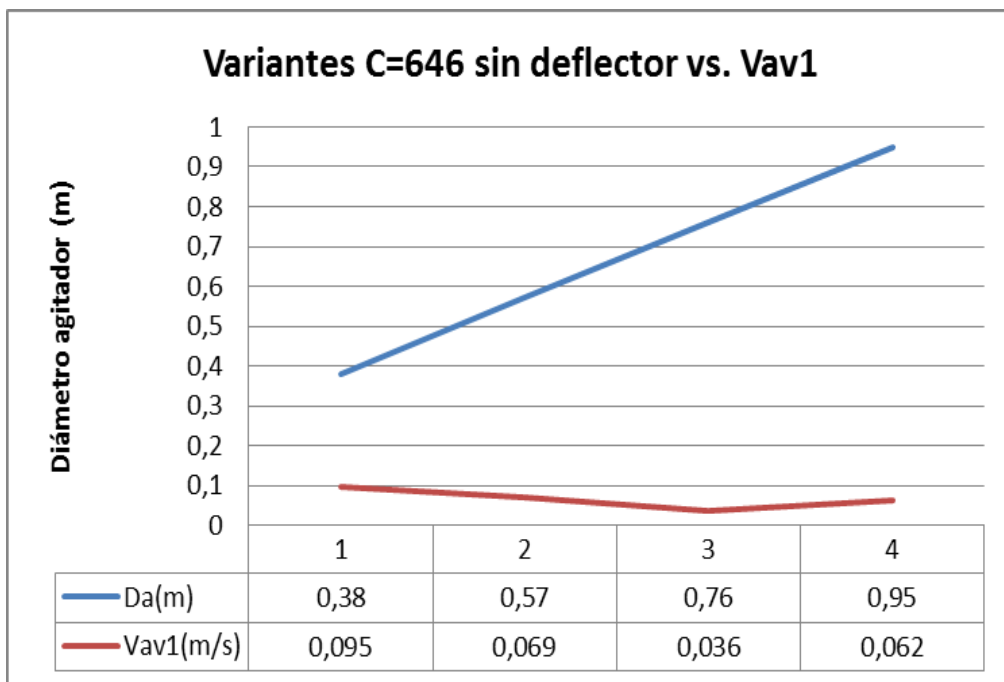


Figura 2.11 Resultados del análisis de las velocidades variantes C=646.

Capítulo II

Las siguientes variantes analizadas demuestran un comportamiento irregular en la variación del diametro con respecto a la velocidad generada, puesto que se observa decrecimientos y crecimientos de la velocidad promedio del fluido a medida que varía el diametro del agitador.

2.7.2 Análisis de las velocidades de las variantes con deflectores.

Para el estudio de este grupo de variantes se realizaron las mismas operaciones con los datos de los parámetros de diseño del agitador obteniendo también otras 16 variantes más, estas con deflectores.

Variante	Código	Rango	C1(mm)	Rango	Da(mm)	Da(m)	Vav 2(m/s)
1	323-380-1	0,17	323	0,2	380	0,38	0,035
2	323-570-1	0,17	323	0,3	570	0,57	0,089
3	323-760-1	0,17	323	0,4	760	0,76	-
4	323-950-1	0,17	323	0,5	950	0,95	-
5	418-380-1	0,22	418	0,2	380	0,38	0,027
6	418-570-1	0,22	418	0,3	570	0,57	0,037
7	418-760-1	0,22	418	0,4	760	0,76	0,027
8	418-950-1	0,22	418	0,5	950	0,95	-
9	532-380-1	0,28	532	0,2	380	0,38	0,022
10	532-570-1	0,28	532	0,3	570	0,57	0,078
11	532-760-1	0,28	532	0,4	760	0,76	0,062
12	532-950-1	0,28	532	0,5	950	0,95	0,029
13	646-380-1	0,34	646	0,2	380	0,38	0,259
14	646-570-1	0,34	646	0,3	570	0,57	0,101
15	646-760-1	0,34	646	0,4	760	0,76	0,039
16	646-950-1	0,34	646	0,5	950	0,95	0,036

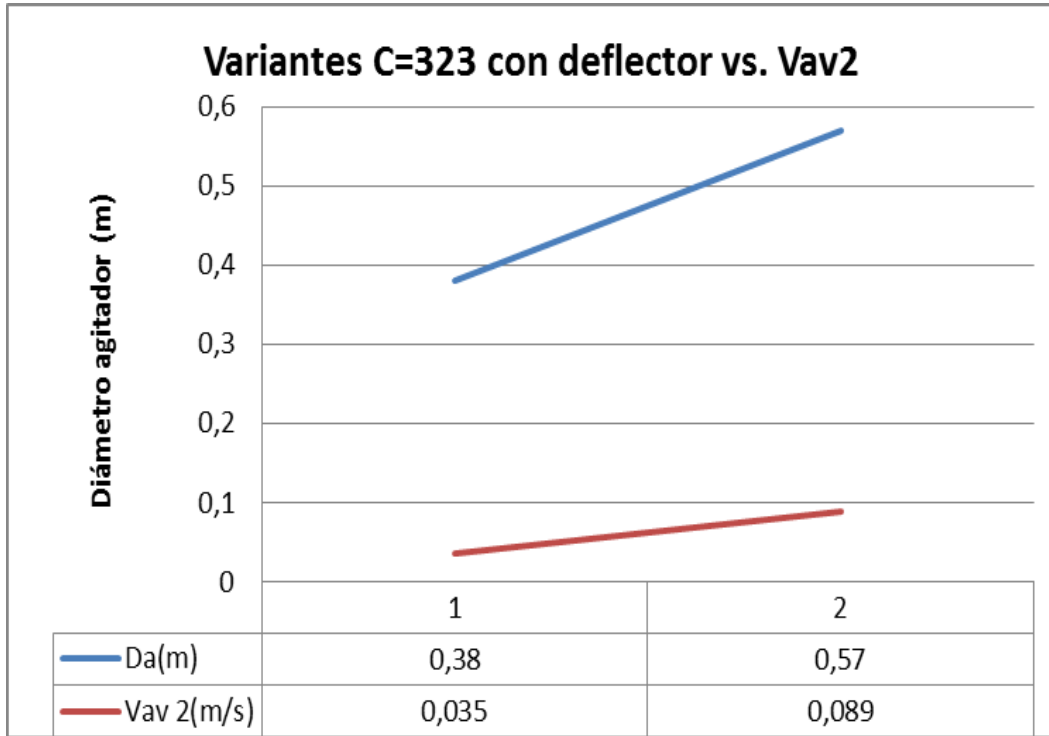


Figura 2.12 Resultados del análisis de las velocidades variantes C=323.

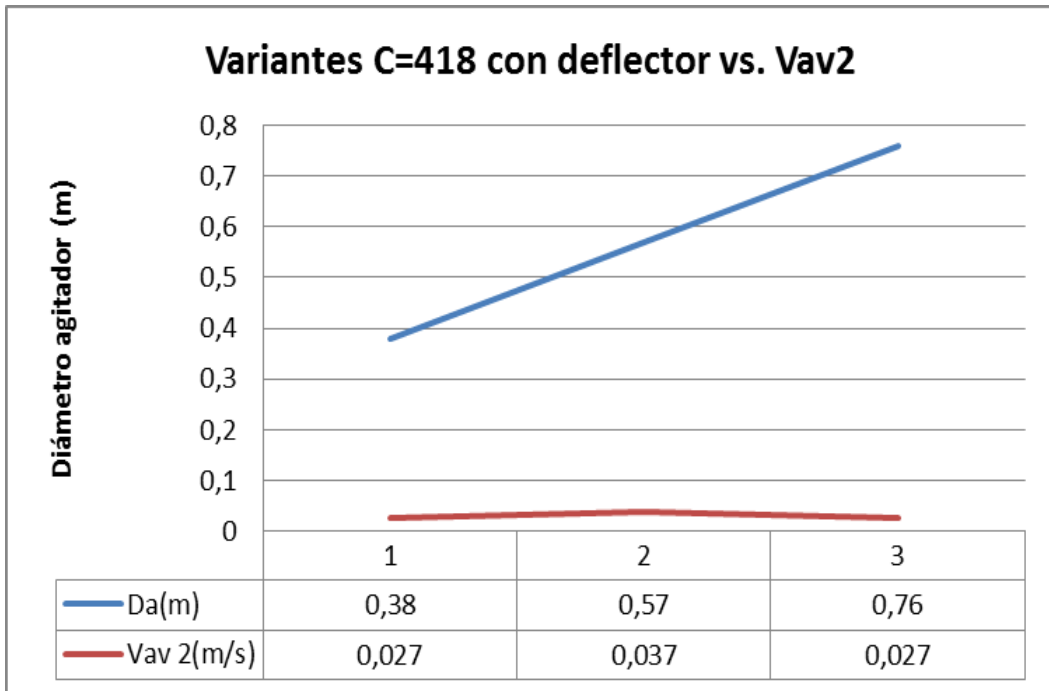


Figura 2.13 Resultados del análisis de las velocidades variantes C=418.

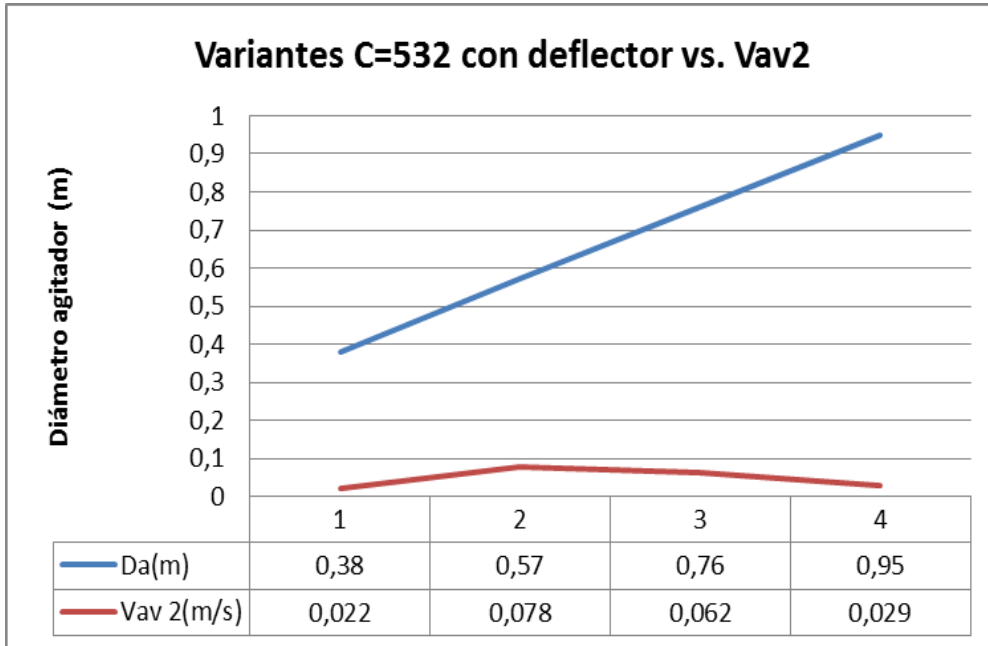


Figura 2.14 Resultados del análisis de las velocidades variantes C=532.

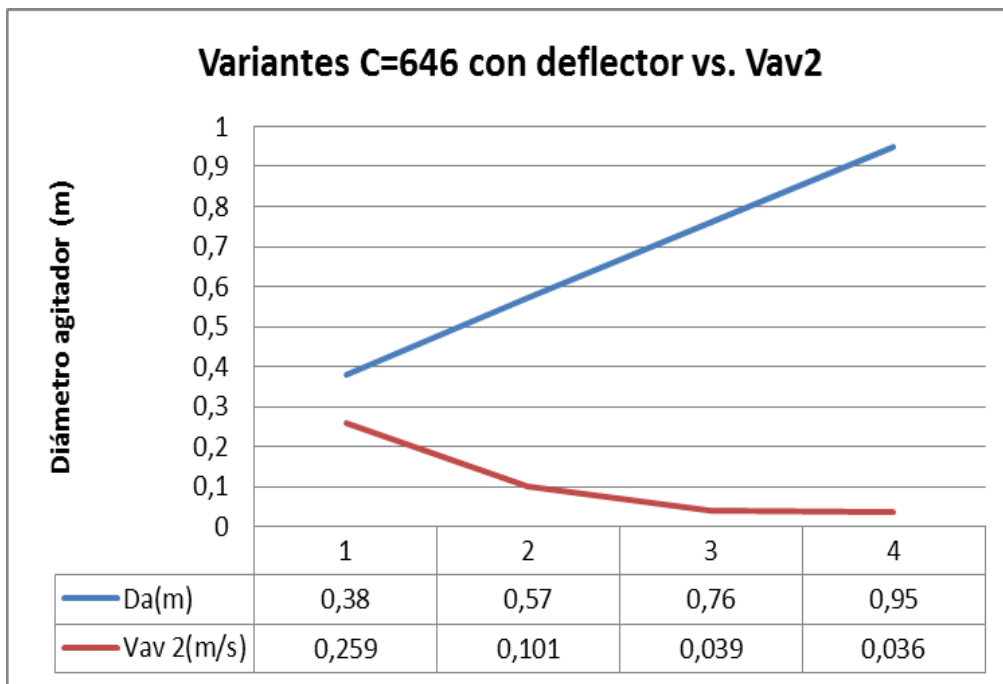


Figura 2.15 Resultados del análisis de las velocidades variantes C=646.

Las variantes analizadas arrojaron como resultado que donde se generan mayores velocidades son las que poseen una altura del agitador al fondo de 646 mm tanto con deflectores como sin deflectores, por lo que se procedió a realizar una comparación entre estas, para la posterior selección de las variantes que cumplan con los requisitos deseados.

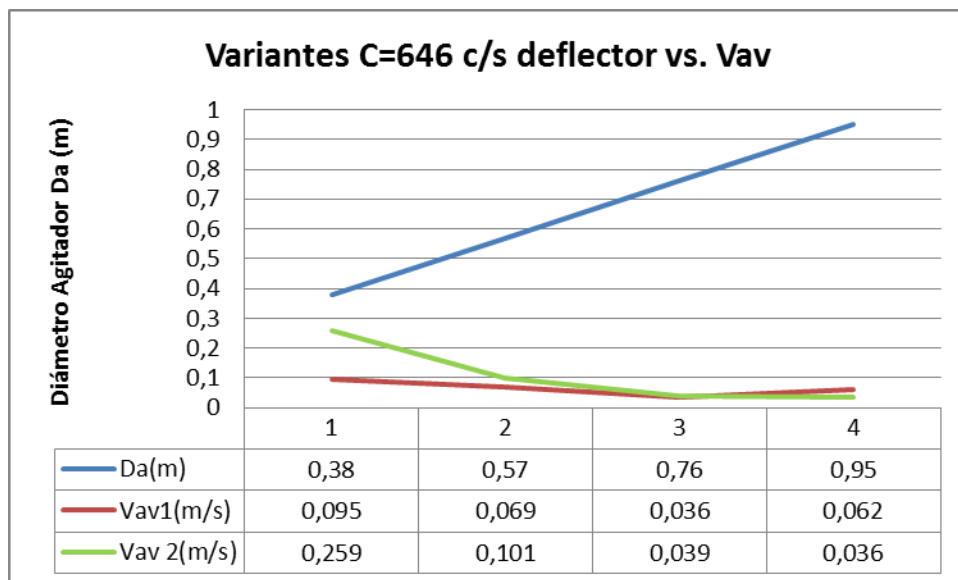


Figura 2.16 Comparación de las variantes con C=646.

El gráfico anterior muestra la influencia de deflectores en las velocidades adquiridas por el fluido, puesto que las variantes que poseen deflector alcanzaron velocidades superiores en comparación a las que no tienen, destacando así la importancia de los mismos.

2.8 Análisis de las simulaciones del agitador mecánico.

Una vez concluido el proceso de modelación (ver figuras 2.3) del sistema agitador tanque del diseño propuesto, pasamos a realizar las simulaciones del sistema a partir de las condiciones antes expuestas, con el objetivo, de visualizar los resultados obtenidos de la simulación mediante las escalas de colores en la sección transversal del tanque. Para una condición de trabajo de 106 rev/min y un valor de concentración de 50% de sólido, equivalente a una densidad de 1450 kg/m³.

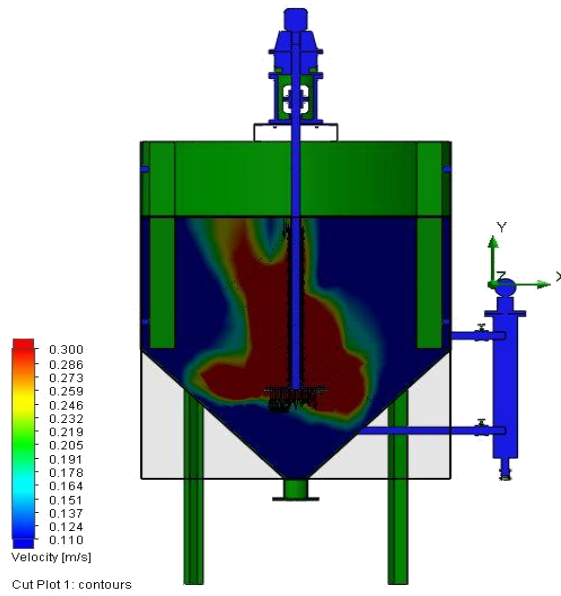


Figura 2.17 Escala de colores de las velocidades obtenidas en la variante 646-570-1.

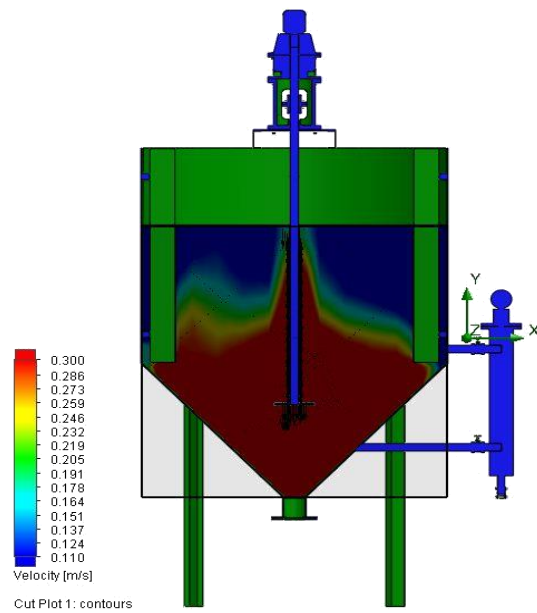


Figura 2.18 Escala de colores de las velocidades obtenidas en la variante 646-380-1.

Capítulo II

Los resultados antes expuestos arrojan como conclusión que las mejores variantes dimensionales del punto técnico son las codificadas 646-380-1 y la 646-570-1 puesto que ellas se generan velocidades favorables para la homogenización del fluido, ya que en la primera la velocidad promedio del fluido alcanza 0.259 m/s la cual supera la velocidad promedio de sedimentación del cieno carbonatado la cual es 0.11 m/s, (Pérez, 2013), y en la otra variante se genera una velocidad promedio de 0.101 m/s que no supera la velocidad promedio de sedimentación del cieno carbonatado pero se acerca a la misma. Por lo que se deja a consideración de los especialistas para que ellos decidan la variante que se desea instalar.

2.9 Análisis de la potencia de las variantes del agitador propuesto.

En el cálculo de la potencia necesaria para mover el impulsor se utilizan números adimensionales, como es el caso del número de Reynolds, el cual debe tener un valor de ($Re=10000$) para modelar un estado turbulento. También se asume un valor de ($K_T=1,27$) teniendo en cuenta el tipo de flujo, el tipo de agitador empleado y el número de palas, ver en (Anexo 1). La modelación se realiza para un 50% de concentración de sólido.

Para evitar un sobrecalentamiento del motor se debe trabajar con un factor de seguridad, que generalmente es decidido por el personal de diseño, el factor de seguridad del 30% indica un sistema completamente seguro, el 20% indica un sistema medianamente seguro y el 10% indica un sistema de protección bajo.

Variantes	Da(mm)	N(rpm)	P(kW)	Pc(kW)
1	380	15,931	59	76,70
2	570	7,081	39,33	51,13
3	760	3,983	29,5	38,35
4	950	2,59	23,6	30,68

En la siguiente tabla se observa como a medida que el diámetro del agitador aumenta, disminuye la potencia consumida por el motor o moto-reductor encargado de mover el agitador. Esto se debe a que el diámetro del agitador es inversamente proporcional a la velocidad angular con que debe rotar el motor y esta a su vez es directamente proporcional a la potencia consumida por el mismo. Puesto que las variantes seleccionadas del punto de vista técnico son en este caso la 1 y la 2, se hace una comparación entre ellas para seleccionar la más factible. Teniendo en cuenta que la instalación está destinada para desarrollar estudios y experimentos y no se utiliza periódicamente, se escoge la variante que a pesar de ser la que mayor consumo de potencia posee, lo que trae como consecuencia mayor consumo de energía eléctrica, supera la velocidad promedio de sedimentación del cieno carbonatado y cumple con el objetivo de homogenizar dicho fluido siendo este el objetivo que se quiere alcanzar.

2.10 Análisis tensional del agitador por el método de elementos finitos.

El método de los elementos finitos da la posibilidad de analizar los esfuerzos y deformaciones que actúan simultáneamente en una pieza o conjunto de piezas al ser sometidas a un sistema de cargas, (Ciofalo, Pastado, Grisafis, & Torraca, 1995).

2.10.1 Modelado geométrico del agitador en SolidWorks.

La pieza 3D es el bloque de construcción básico del software de diseño mecánico SolidWorks. Un modelo de SolidWorks se compone de piezas, ensamblajes y dibujos; generalmente se empieza con un croquis, se crea una operación base y a continuación se agregan más operaciones al modelo. Se puede completar libremente el diseño agregando, cambiando o reorganizando las operaciones.

Para la construcción del modelo del agitador se partió de un croquis o boceto 2D, que con posterioridad y aplicando las diferentes operaciones, llegaron a generar la pieza en 3D. (Ver figura 2.19)

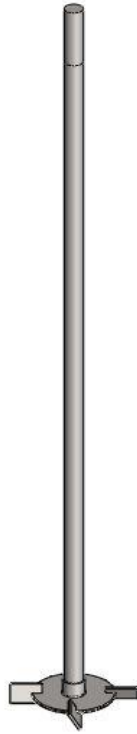


Figura 2.19. Modelo geométrico del agitador en SolidWorks.

2.10.2 Análisis del agitador con el empleo del módulo Simulation.

A continuación se describe la secuencia del estudio del conjunto de agitación empleando el módulo Simulation.

1. Selección del tipo de estudio a realizar.

Análisis estático →



Capítulo II

2. Asignación de material.

La respuesta de la pieza o ensamblaje a analizar depende del material del que se compone. Simulation debe conocer las propiedades elásticas de ese material. Al modelo del agitador se le consideró como propiedades físicas isotrópicas elástico lineal propias del material acero AISI 1020 de la biblioteca de materiales del Solid Works (ver tabla 7).

Tabla 7. Propiedades físicas del acero AISI 1020		
Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2e+011	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0,29	N/D
Modulo cortante	7,7e+010	N/m ²
Densidad	7900	Kg/m ³
Límite de tracción	420507000	N/m ²
Límite de compresión en X	-	N/m ²
Límite elástico	351571000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	1,5e-005	/k
Conductividad térmica	47	W/(m*K)
Calor especifico	420	J/kg*K

3. Aplicación de restricciones y cargas.

Las restricciones se colocaron en las superficies superiores del agitador que se ubica dentro de motor o caja reductora de velocidades y el soporte del mismo. (Ver Figura 2.20, color verde).

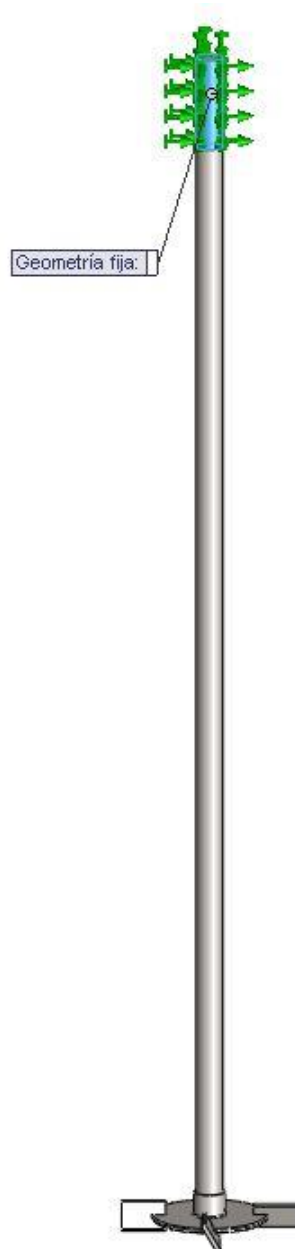


Figura 2.20 Aplicación de cargas y restricciones.

Las cargas que se aplicaron sobre el agitador, son las presiones obtenidas en el estudio de Flow Simulation y se aplica normal a la superficie que desplaza el fluido, contrario al sentido de rotación del agitador ya en este estudio se determinaron las presiones que actúan normal a las aletas del conjunto de agitación, y se utiliza la presión máxima obtenida en el estudio anterior, o sea, 156412.03 N/m^2 (Ver Figura 2.21 y 2.22 color rojo).

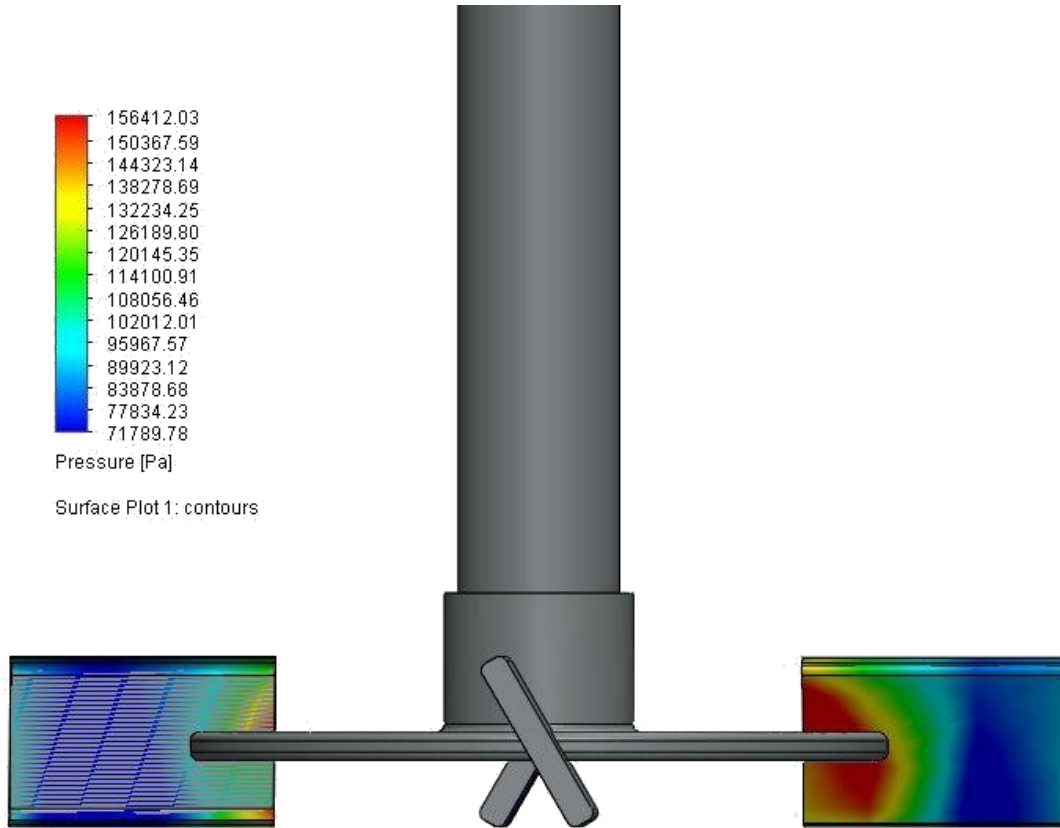


Figura 2.21 Presión total del fluido en las superficies de las aspas del agitador.

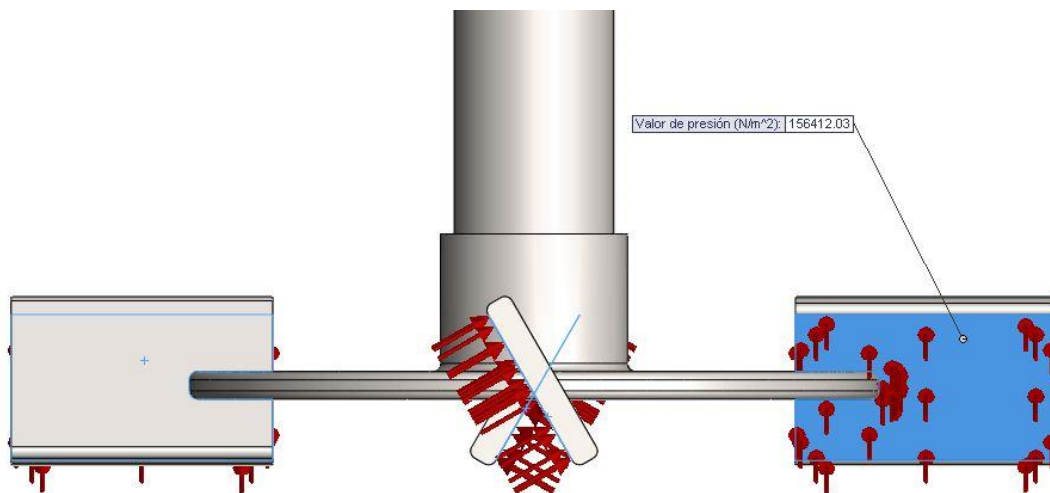


Figura 2.22 Aplicación de la presión.

Capítulo II

4. Mallado del modelo.

El mallado es un paso crucial en el análisis. El mallado automático en el Simulation genera una malla basada en el tamaño del elemento finito, la tolerancia y los parámetros de control de dicha malla. El software estima un tamaño de elemento global tomando en cuenta consideraciones tales como volumen, área superficial y otros detalles geométricos (Ver figura 2.23). El mallado del modelo tiene las siguientes características:

Tabla 8. Características del mallado.

Nombre de estudio	Estudio 2 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	19.6837 mm
Tolerancia	0.984186 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	15802
Número total de elementos	8599
Cociente de aspecto máximo	23.484
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	84.8
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0.709
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:03
Nombre de computadora	EIPHCAD

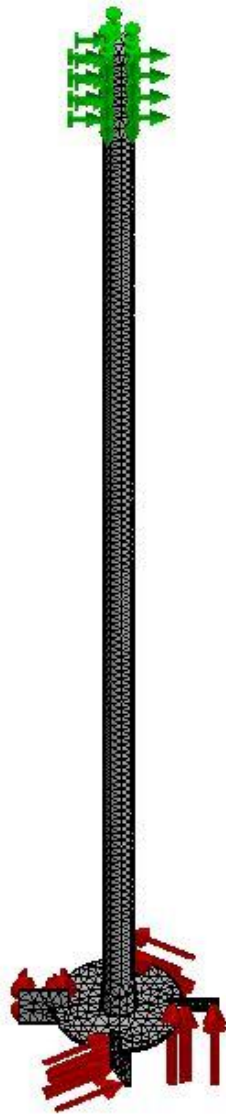


Figura 2.23. Mallado del modelo.

5. Resultado del cálculo estático.

Después de terminado el análisis, se obtuvo como resultado que los valores de tensión alcanzaron 46,4 (MPa) lo que conlleva a un coeficiente de seguridad de 7,6 en condiciones de cargas extremas, el límite elástico del acero AISI 1020 es 351 (MPa), lo que arrojó como resultado que el mismo soporta dichas presiones.

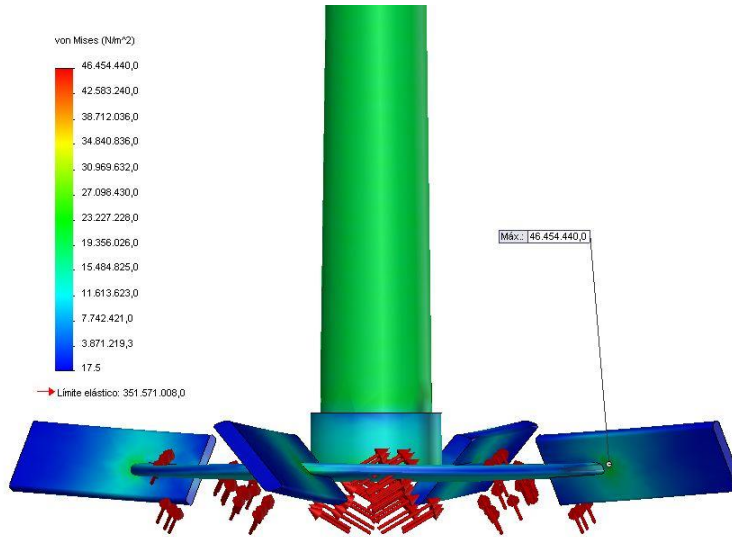


Figura 2.24. Teniones Von Mises.

Nombre de modelo: Ensamblaje1
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
Criterio: Automático
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 7.6

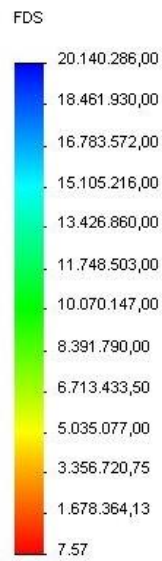


Figura 2.25. Verificación del diseño.

2.11 Valoración económica.

Para calcular el gasto por consumo de energía eléctrica del sistema de agitación propuesto, se hace necesario la evaluación fundamentalmente del costo de energía que emplearía el motoreductor según la potencia que necesita para agitar un 50% de cieno carbonatado con agua. A continuación se muestra la ecuación utilizada para el cálculo del gasto por consumo de energía eléctrica. Según, (Gómez, 2010)

$$G_{elec} = \frac{T \cdot N_m \cdot K_p \cdot t_{pu}}{\eta} \quad (2.16)$$

Donde:

G_{elec} - gasto por consumo de energía eléctrica; (CUP/año)

T - tarifa de corriente eléctrica; (CUP/ kW/h),

N_m - potencia consumida por el motor del agitador; (kW),

K_p - coeficiente de pérdida

t_{pu} - tiempo de trabajo del agitador; (h/año)

η - rendimiento del motor eléctrico; (%)

Teniendo en cuenta que el valor de la tarifa eléctrica es equivalente a 0,31 CUP/kW/h, el tiempo de trabajo del equipo es de 260 h/año, el rendimiento del motor eléctrico es de 91 %, el coeficiente de pérdida es de 4,16 y la potencia consumida por el motor es de 76.7 kW para la variante 646-380-1 y de 51.13kW para la variante 646-570-1, damos como resultado un gasto por consumo de energía eléctrica de 28,150.00 CUP/año y 18,747.09 CUP/año respectivamente.

2.12 Valoración medioambiental.

Los impulsores industriales necesitan una fuente de energía para su funcionamiento por estar acoplados a un eje movido por un motor. Cada motor consumirá una determinada energía por unidad de tiempo en función de las condiciones de operación y tipo de agitador; si bien es cierto que agitadores más grandes y pesados consumirán más energía que otros más pequeños,

Capítulo II

dentro de una misma tipología de agitador se puede conseguir minimizar el consumo de energía optimizando su funcionamiento. Es en este punto donde la utilización de la CFD cobra su mayor importancia.

En vez de construir pesados y complicados prototipos, con el gasto energético, de tiempo y de recursos que ello supone, se puede recurrir a la tecnología informática y con el uso de la computación (o estación de trabajo) y el software adecuado (Solidworks2013, en este caso), se pueden simular múltiples prototipos sin la necesidad de crearlos físicamente. Claro está, que el funcionamiento de uno o varios ordenadores consume recursos energéticos, pero no se equipara, al consumo que supondría la construcción y prueba de prototipos. Por todo lo dicho anteriormente, cabe decir que el uso de CFD tiene una incidencia positiva sobre el medioambiente porque permite ahorrar, sobretodo recursos energéticos.

CONCLUSIONES.

1. El uso de herramientas CAD de avanzada permitió desarrollar el modelo tridimensional de la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa, el cual está disponible para futuras investigaciones científico-técnicas.
2. La simulación obtenida con herramientas CAE permitió demostrar la influencia de los cambios dimensionales del conjunto de agitación en la homogenización del lodo.
3. Los resultados logrados con el uso de tecnologías CAD-CAE permitieron potenciar el proceso de toma de decisiones bajo criterios técnico-económicos.
4. Se cuenta con un procedimiento para evaluar la influencia de los parámetros dimensionales del agitador en el comportamiento de la homogenización del lodo de la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES.

1. Realizar simulaciones con otros tipos de fluido para determinar la influencia de los cambios dimensionales del conjunto de agitación en la homogenización de los mismos.
2. Utilizar de forma sistemática los métodos de cálculo por elementos finitos en el diseño de agitadores.
3. Analizar a partir del modelo geométrico de la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa, la influencia del diámetro de las tuberías en la caída de presión del cieno carbonatado durante el transporte.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA.

- Ameur, H., & Bouzit, M. (2012). "Agitation of Yield Stress Fluids by Two-Blade Impellers". *Canadian Journal on Chemical Engineering & Technology*.
- Ascanio, G. (2012). "Design Considerations in Laminar Fluid Mixing with Unconventional Geometries, Frontiers in Science and Engineering". *An International Journal Edited by Hassan II Academy of Science and Technology*.
- Aubin, J., Fletcher, D. F., & Xuereb, C. (2004). "Modeling Turbulent Flow in Stirred Tanks with CFD: The Influence of the Modeling Approach, Turbulence Model and Numerical Scheme, Experimental, Thermal and Fluid Science."
- Aubin, J., & Xuereb, C. (2006). "Design of Multiple Impeller Stirred Tanks for the Mixing of Highly Viscous Fluids Using CFD". *Chemical Engineer Science.*, 2913-2920.
- Bahl, C., Gely, M., & Pagano, A. (2012). "Patrones de flujo en reactores químicos: desarrollo de modelos matemáticos y numéricos basados en CFD". *Mecánica Computacional XXXI*.
- Ciofalo, M., Pastado, A., Grisafis, F., & Torraca, N. (1995). *El flujo turbulento encerrado y libremente superficial en tanques con baffles agitados por impulsores radiales.*, Universidad de Palermo., Palermo.
- DIN. (1992). Agitators and baffles for agitator vessels; types, terms and main dimensions. (Vol. 28131, pp. 8). Berlin: DIN.
- Duany, E. D. (2013). *Análisis y Propuesta de Variante de diseño para Agitadores de Fluidos Industriales en tanques de recirculación en la Empresa Siderúrgica "Alfredo Maneiro" Puerto Ordaz, Venezuela.*, Universidad de Holguín., Holguín.
- García, L. P., Puyáns, L. G., Purón, A. L. R., & Angélica, R. S. (2010). Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa, Cuba. *Minería y Geología.*, 26, 21. Retrieved from www.redalyc.org
- García., L. P., Puyáns, L. G., Purón, A. L. R., & Angélica, R. S. (2010). "Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa, Cuba". *Minería y Geología.*, 26, 16-35.
- Gómez, C. (2010). *Perfeccionamiento del sistema de transporte de Cieno Carbonatado en la planta del Puerto Moa.*, Instituto Superior Minero Metalúrgico., Moa.
- Greene, A. (1995). *Flujo de Fluidos*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- Guha, D. (2007). *Hydrodynamics and Mixing in Single Phase and Liquid-Solid Stirred Tank Reactors.*, Sever Institute of Washington University., Missouri.

Bibliografía

- Hickman, D. A. (1985). *"Agitation, mixing and mass transfer in simulated high viscosity fermentation broths"*. University of Birmingham., Birmingham.
- Kubicki, D., & Simon, L. (2012). *"CFD predictions of solids distribution in stirred vessel"*. Paper presented at the Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO.
- Magdaleno, D., Navarro, J., & Nieto, H. (2002). *"Estudio de la potencia requerida en el proceso de agitación de un líquido"*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Barcelona., Barcelona.
- Martín, M. (2008). *"Bubbling process in stirred tank reactors II: Agitator effect on the mass transfer rates, Chemical Engineering Science"*. .
- Martínez, V. (2010). *"Simulación matemática para evaluar la eficiencia en un reactor para reciclado de plomo"*. *Avances en ciencias e ingeniería.*, 1-13.
- Matthias, E., & Rasmuson, A. (2012). *"Influence of solids on macro-instabilities in a stirred tank"*. Paper presented at the 14th European Conference on Mixing., Warszawa.
- McCabe, S. (1993). *Unit operations of chemical engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Medina, E. (2007). *"Determinación del campo de velocidades generado en un líquido viscoso por la acción de dos rotores de paletas planas en una cavidad cilíndrica utilizando piv-2d"*. Paper presented at the 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica., Cuzco.
- Orrego, S. (2009). Simulación de fluidos utilizando computadores: una moderna herramienta para el estudio y análisis de fluidos. Retrieved from <http://mecanica.eafit.edu.co>
- Pérez, H. B. (2013). *Propuesta de un sistema de agitación mecánica para la instalación semiindustrial de hidrotransporte del ISMM.*, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Perry, R. (2001). *Manual del ingeniero Químico*. (7 th ed.). Madrid: Mc Graw Hill.
- Rao, D. A., & Sivashanmugam, P. (2010). "Experimental and CFD simulation studies on power consumption in mixing using energy saving turbine agitator". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.
- Shitanshu, G. (2012). *"CFD Modeling of Solid Suspension in a Stirred Tank: Effect of Drag Models and Turbulent Dispersion on Cloud Height"*. Paper presented at the International Journal of Chemical Engineering.
- SolidWorks. (2013). *Flow Simulation*. Massachusetts: Dassault Systemes.
- Suarez, V., & Trujillo. (2011). *Diseño y construcción de un equipo de prueba de jarras para la tratabilidad de aguas residuales.*, Riobamba. Ecuador.
- Taghavi. (2011). "Experimental and CFD investigation of power consumption in a dual Rushton turbine stirred tank". *Chemical Engineering Research and Design.*, 300.

Bibliografía

- Thakur, R. K. (2004). "Mixing of complex fluids with flat-bladed impellers: effect of impeller geometry and highly shear-thinning behavior". *Chemical Engineering and Processing*.
- Torres, E. (2000). *Transporte de partículas en flujos de gases para el incremento de la eficiencia del proceso de secado*. Paper presented at the Segunda Conferencia Internacional CINAREM.
- Ulate, A., & Vásquez, A. (2010). "Determinación de un modelo para el consumo de energía con Suspensión total de sólidos en fluidos newtonianos". *Ciencia y Tecnología.*, 26(58), 70.
- Wadnerkar. (2012). "CFD simulation of solid–liquid stirred tanks". *Advanced Powder Technology*.
- Yapici, K. (2003). *Numerical investigation of stirred tank hydrodynamics*. Middle East Technical University., Turkey.

Anexos

ANEXOS.

Anexo1.

Tabla A1. Rango de densidades y viscosidades para los distintos porcentos de solidos con que se trabajaron en la instalación.

% de solido	ρ_{pulp} (kg/m ³)	μ_{pulp} (Pa*s)
30	1226	0,115
35	1274	0,163
38	1304	0,193
40	1325	0,214
45	1382	0,273
48	1418	0,307
50	1443	0,332

Tabla A2. Valores de las constantes (K_L -laminar y K_T -turbulento) para el cálculo de la potencia.

Tipo de impulsor	K_L	K_T
Impulsor hélice, tres palas		
Paso 1.0	41	0.32
Paso 1.5	48	0.87
Turbina		
Disco de seis palas	65	5.75
Seis palas inclinadas	----	1.63
Cuatro palas inclinadas	44.5	1.27
Paleta plana, dos palas	36.5	1.70
Impulsor HE-3	43	0.28
Ancla	300	0.35

Anexos

Anexo 2.

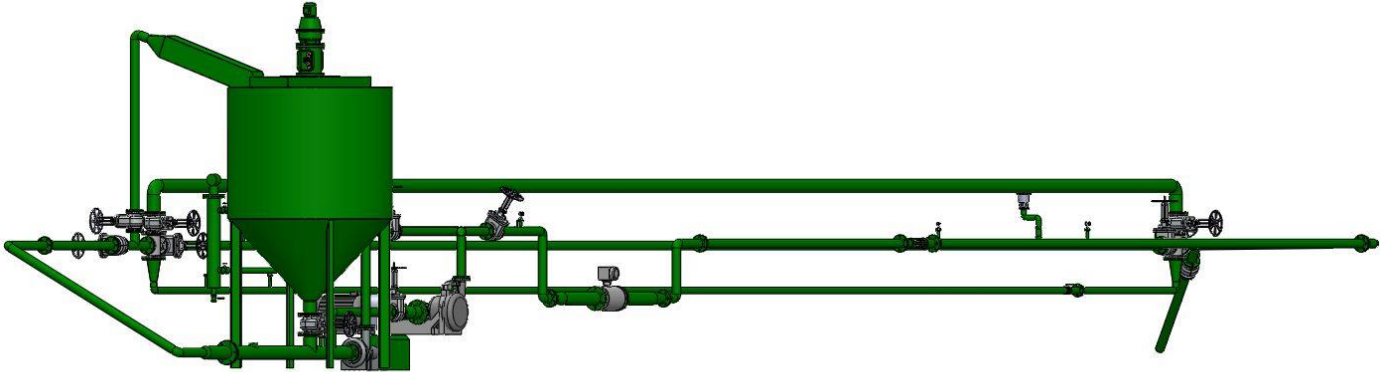


Figura1. Instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa.

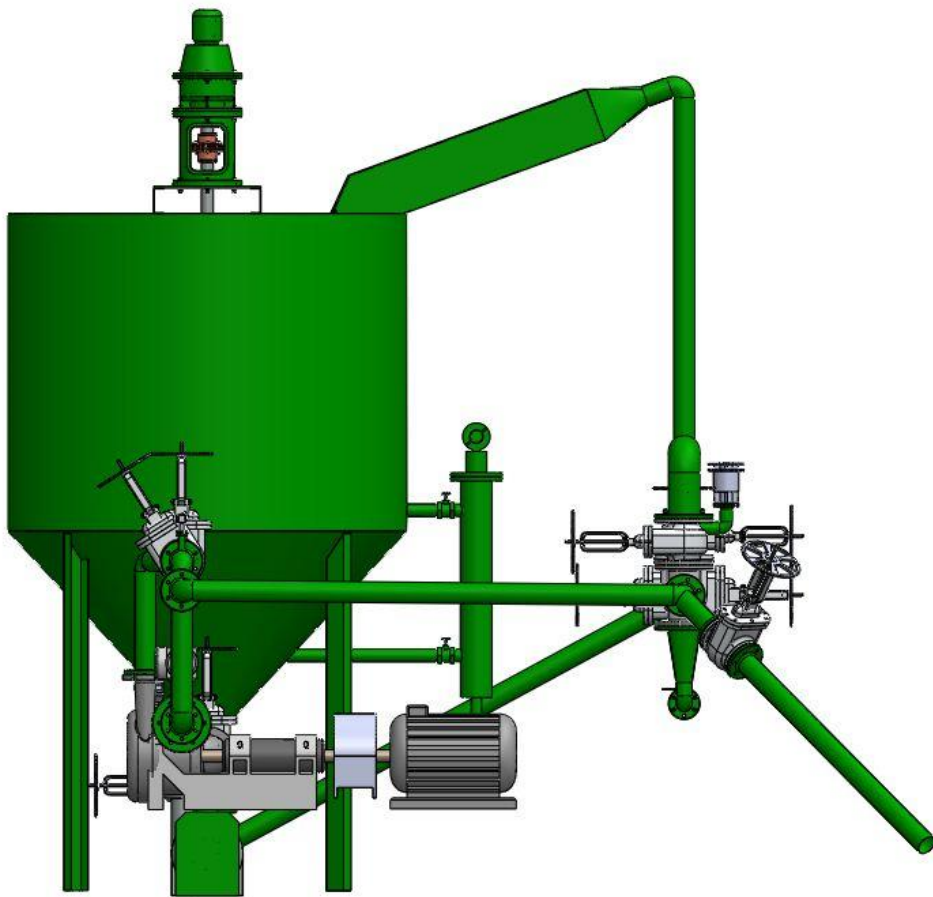


Figura 2. Instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa.

Anexos



Figura 3. Instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa.

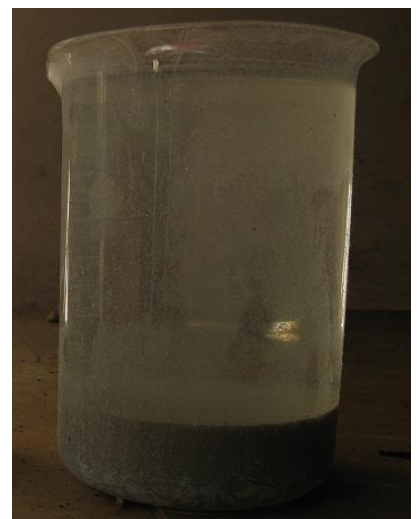


Figura 4. Cieno Carbonatado.

Anexos

Anexo 3. Estudios de variantes con deflectores

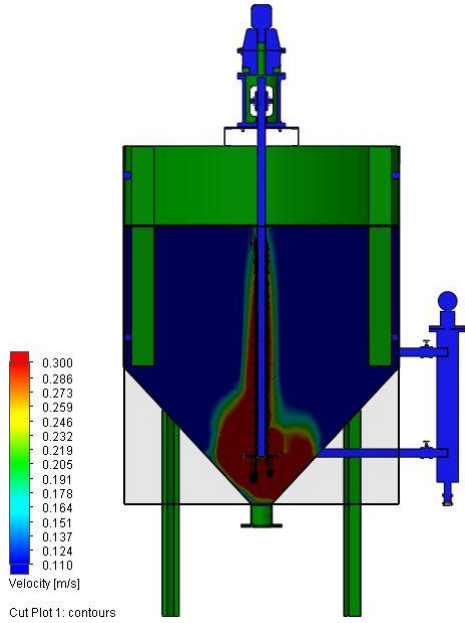


Figura 5. Estudio variante 323-380-1

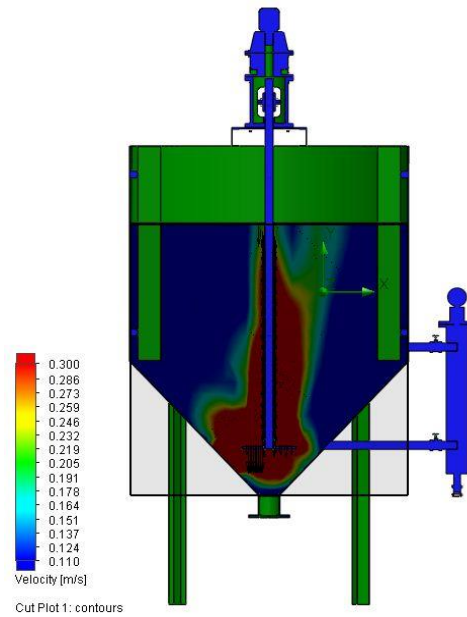


Figura 6. Estudio variante 323-570-1

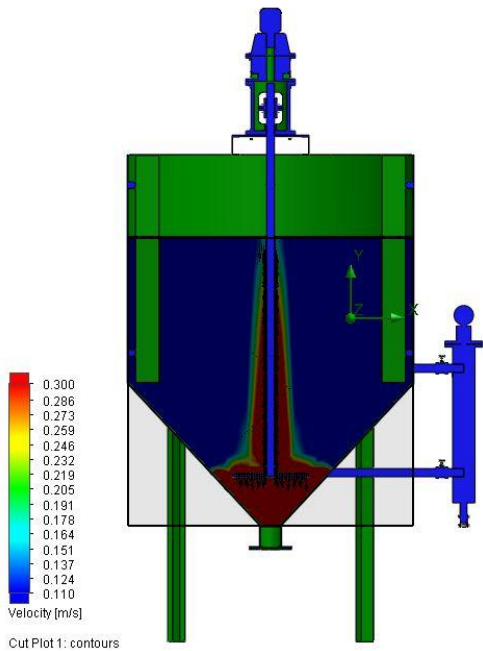


Figura 7. Estudio variante 323-760-1

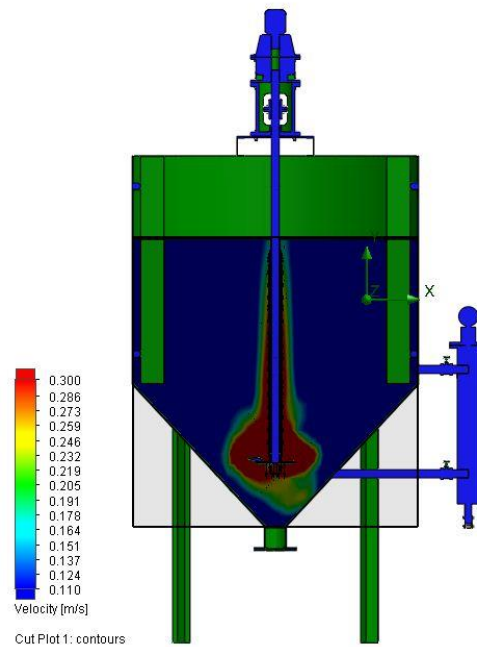


Figura 8. Estudio variante 418-380-1

Anexos

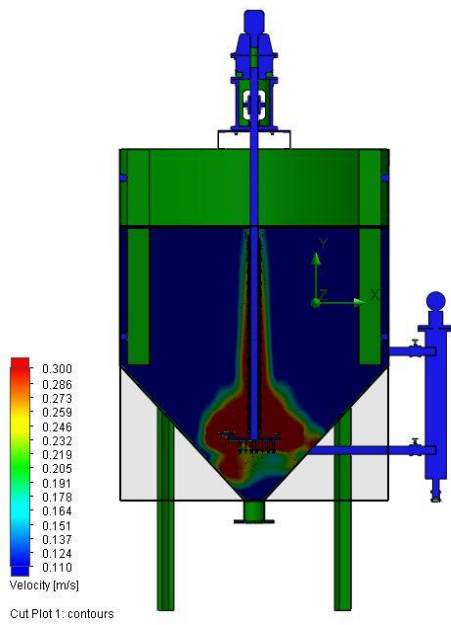


Figura 9. Estudio variante 418-570-1

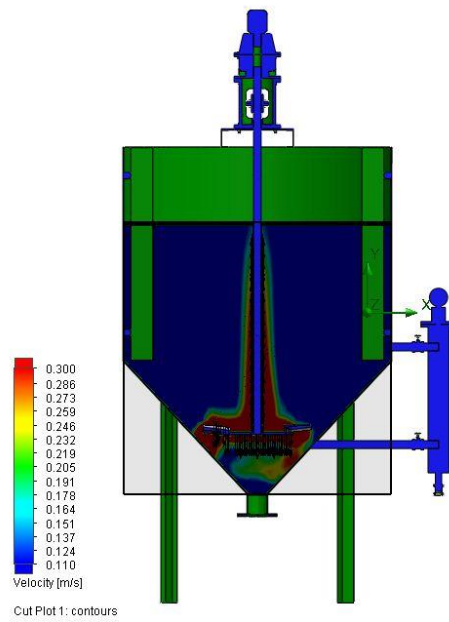


Figura 10. Estudio variante 418-760-1

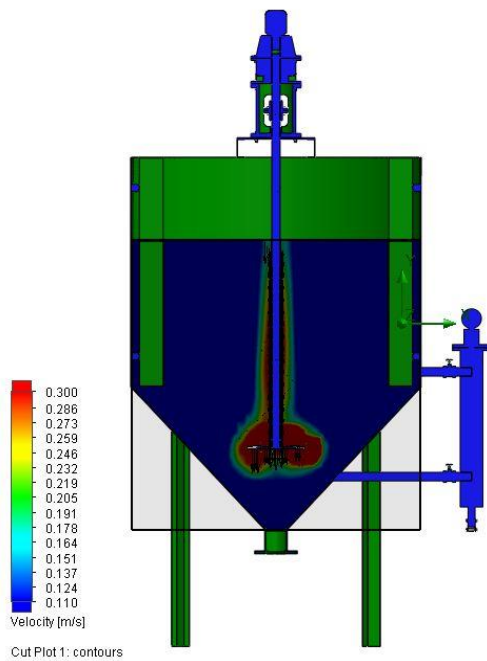


Figura 11. Estudio variante 532-380-1

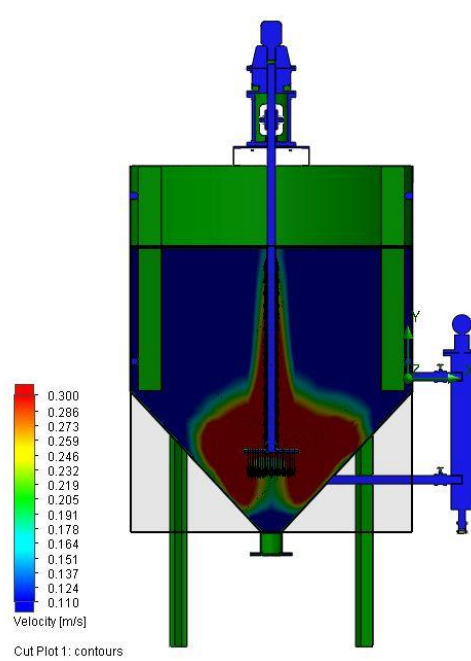


Figura 12. Estudio variante 532-570-1

Anexos

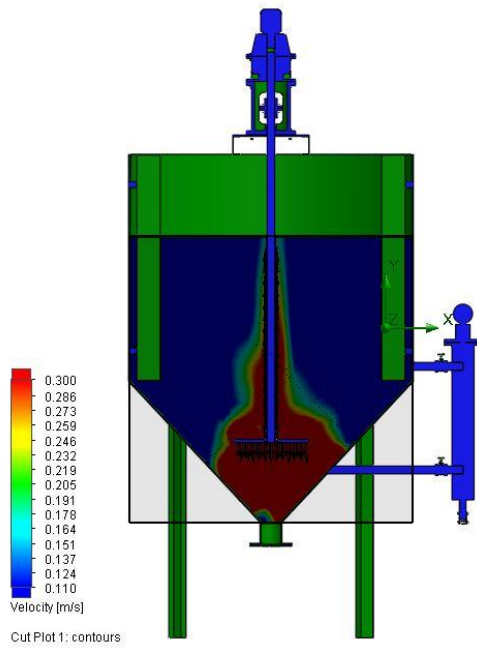


Figura 13. Estudio variante 532-760-1

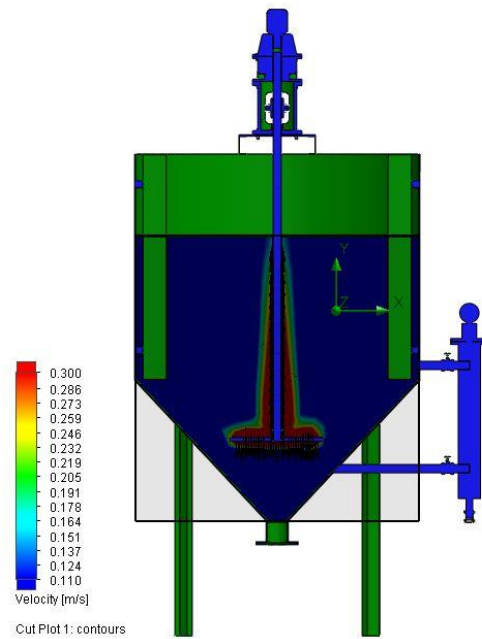


Figura 14. Estudio variante 532-950-1

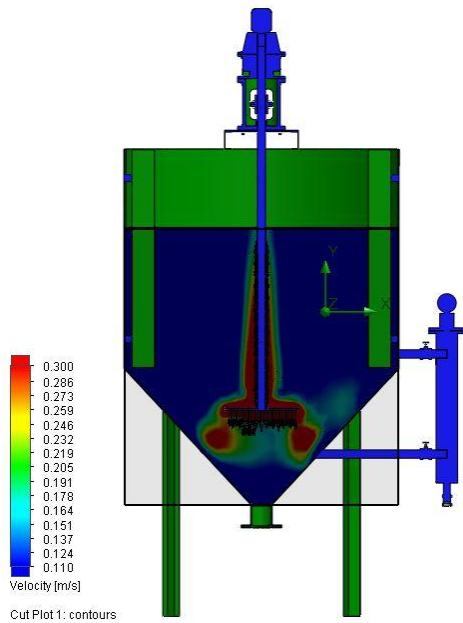


Figura 15. Estudio variante 646-760-1

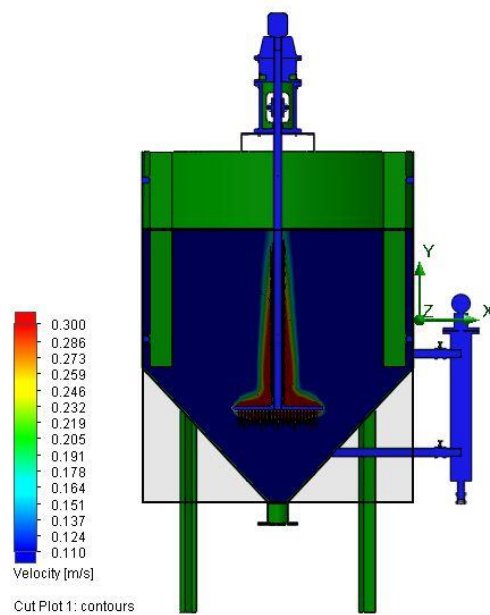


Figura 16. Estudio variante 646-950-1

Anexos

Anexo 4. Estudios de variantes sin deflectores

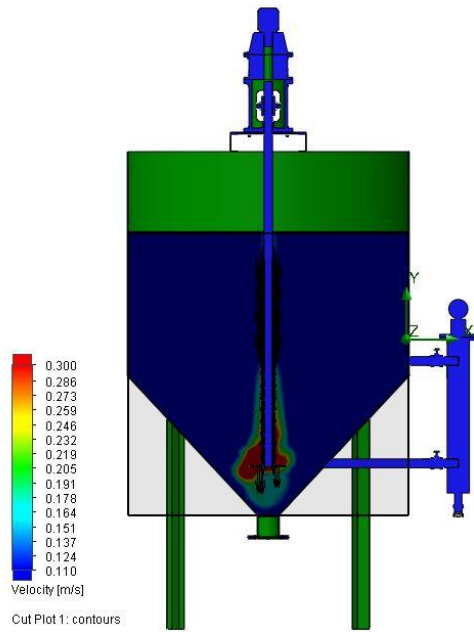


Figura 17. Estudio variante 323-380-0

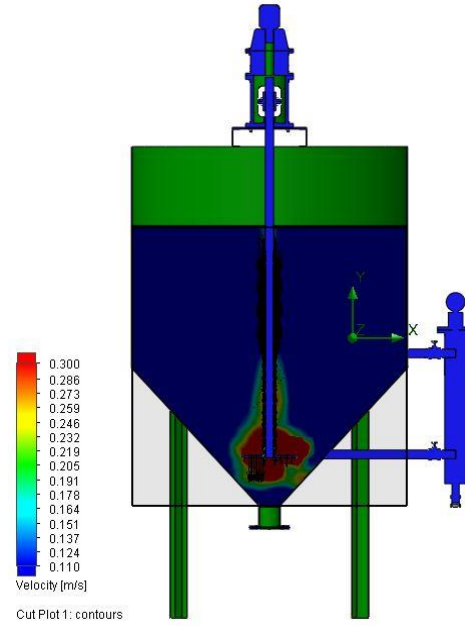


Figura 18. Estudio variante 323-570-0

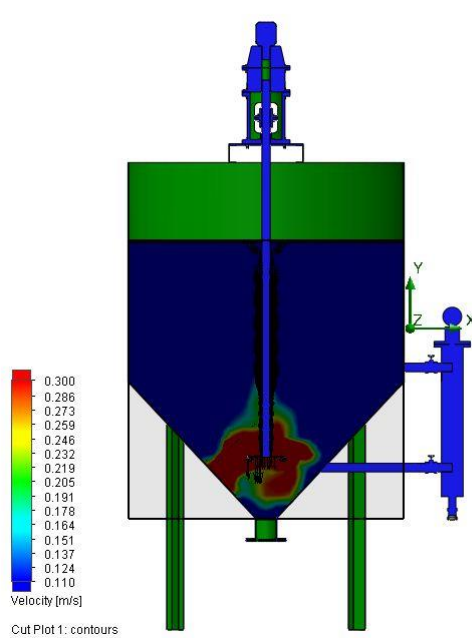


Figura 19. Estudio variante 418-380-0

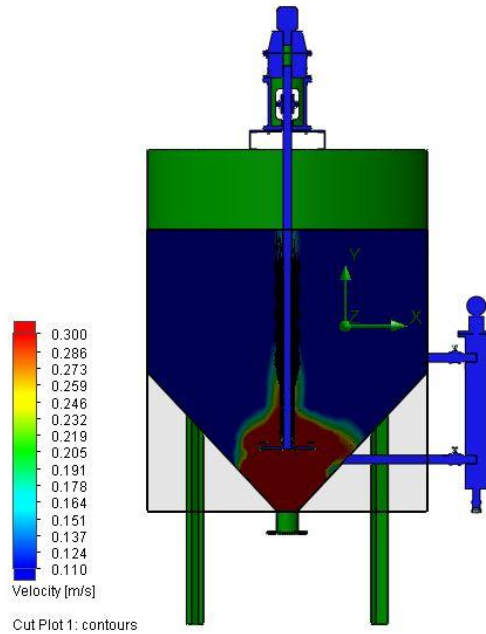


Figura 20. Estudio variante 418-570-0

Anexos

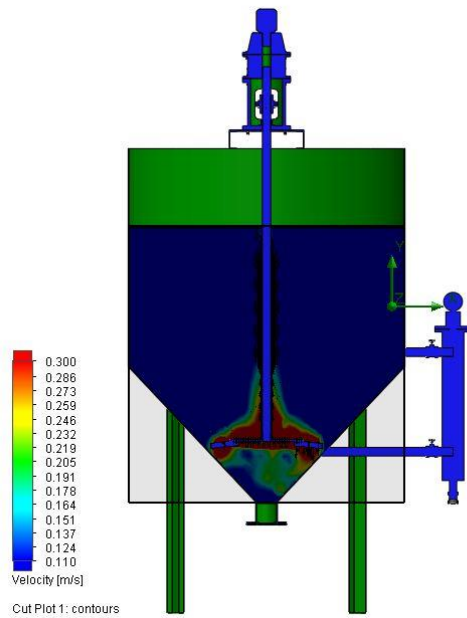


Figura 21. Estudio variante 418-760-0

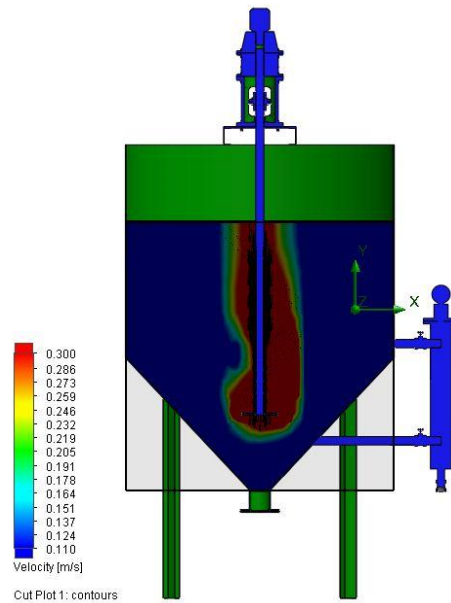


Figura 22. Estudio variante 532-380-0

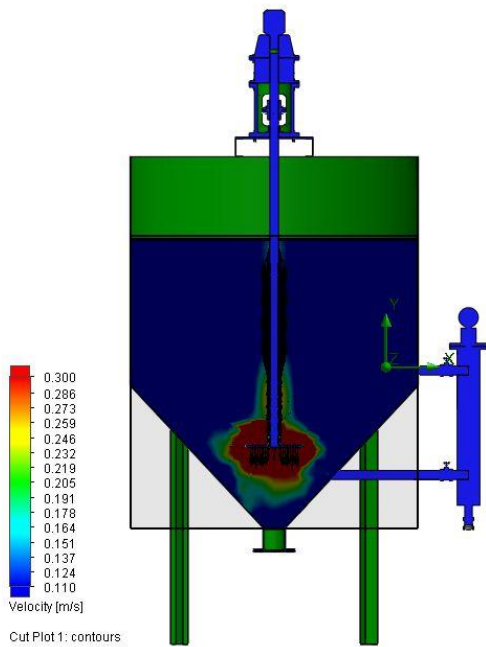


Figura 23. Estudio variante 532-570-0

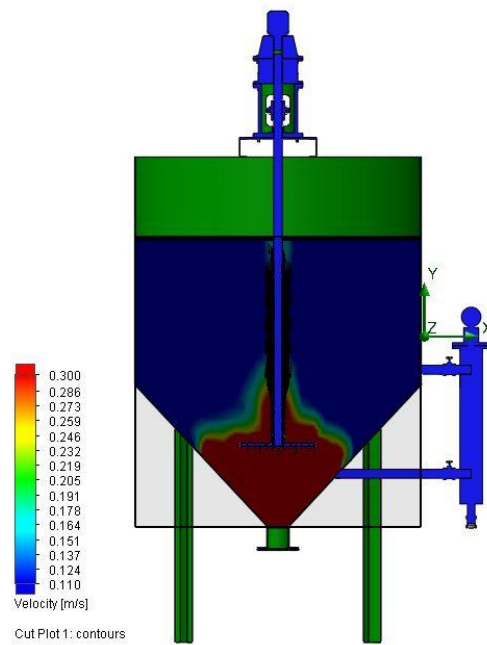


Figura 24. Estudio variante 532-760-0

Anexos

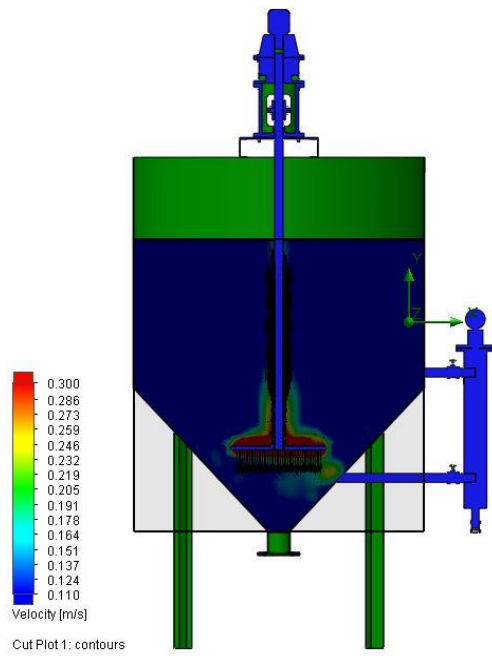


Figura 25. Estudio variante 532-950-0

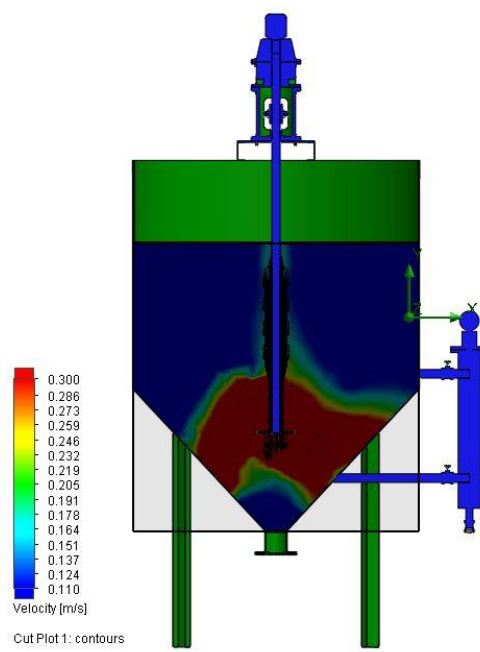


Figura 26. Estudio variante 646-380-0

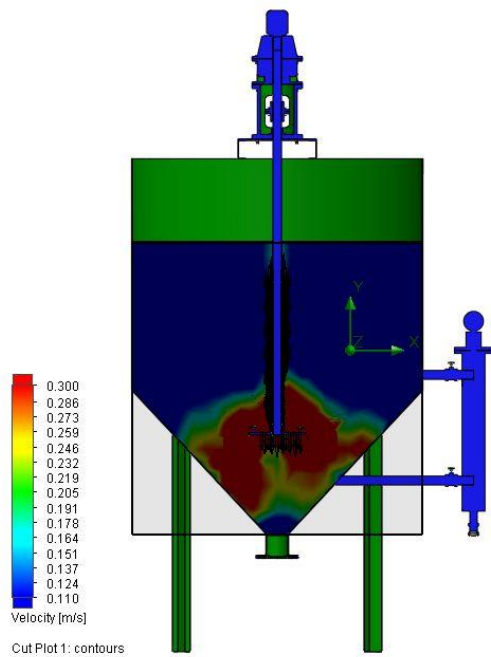


Figura 27. Estudio variante 646-750-0

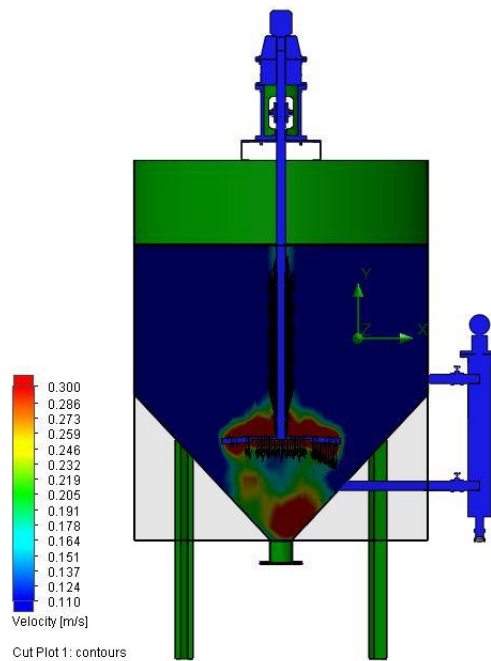


Figura 28. Estudio variante 646-760-0

Anexos

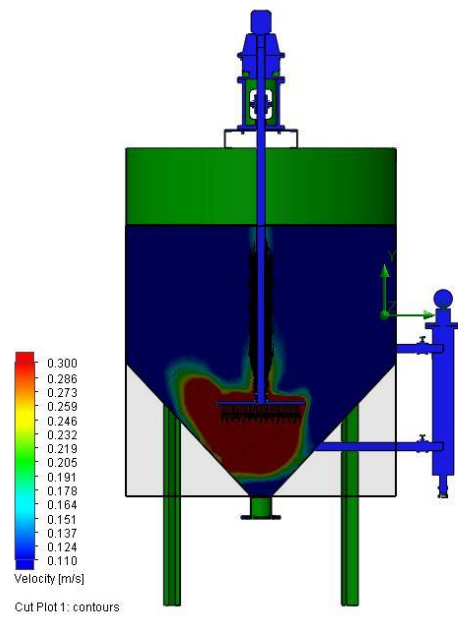


Figura 29. Estudio variante 646-950-0