



**UNIVERSIDAD MICHUANA DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALURGICAS**

**“MODELACION MATEMATICA Y FISICA DE UN NUEVO
DISEÑO DE DISTRIBUIDOR DE COLADA CONTINUA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
**MAESTRO EN METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS
MATERIALES**

PRESENTA
ARMANDO LOPEZ MIRANDA

ASESORES
DR. RAMIRO ESCUDERO GARCIA
DR. GERARDO BARRERA CARDIEL

CO-ASESOR:
DR. JOSE DE JESUS BARRETO SANDOVAL

Morelia, Michoacán. Febrero del 2009





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALÚRGICAS

Morelia, Mich., Enero 15 del 2009.

**C. I.Q. ARMANDO LOPEZ MIRANDA
PRESENTE**

Esta Dirección del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tiene a bien informar a usted que se aprueba el desarrollo y tema de tesis titulado:

***"MODELACION MATEMATICA Y FISICA DE UN NUEVO DISEÑO DE
DISTRIBUIDOR DE COLADA CONTINUA"***

Para presentar su examen de Grado de Maestría en Metalurgia y Ciencias de los Materiales.

La tesis se desarrollará de acuerdo al siguiente capítulo:

Índice General
Lista de figuras y Tablas
Resumen
Introducción
Justificación
Objetivos
Hipótesis
CAPITULO I. REVISION BIBLIOGRAFICA
CAPITULO II. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTAL
CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSION
CAPITULO IV. CONCLUSIONES
Recomendaciones y Sugerencias para Trabajo Futuro
Referencias Bibliográficas
Anexos

Sin otro particular, me es grato saludarle muy cordialmente.

Atentamente


DR. JOSÉ LEMUS RUIZ
DIRECTOR
INST. DE INVEST. METALÚRGICAS
D E
INVESTIGACIONES
METALÚRGICAS

JLR/letg'



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALURGICAS

Morelia, Mich., Enero 15 del 2009.

**C. I.Q. ARMANDO LOPEZ MIRANDA
P R E S E N T E**

Por medio de la presente, esta dirección del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tiene a bien informarle que para presentar su examen de grado de Maestría en Metalurgia y Ciencias de los Materiales, con la tesis titulada ***"MODELACION MATEMATICA Y FISICA DE UN NUEVO DISEÑO DE DISTRIBUIDOR DE COLADA CONTINUA"***, le ha sido asignado la siguiente mesa sinodal:

9900237-0	DR. RAMIRO ESCUDERO GARCIA	(Presidente)
0300379-5	DR. HECTOR GUILLERMO CARREON G.	(Vocal)
930663	DR. JOSE DE JESUS BARRETO SANDOVAL	(Vocal)
7402365-9	DR. FRANCISCO J. TAVERA MIRANDA	(Vocal)
0100306-2	DR. ARNOLDO BEDOLLA JACUINDE	(Vocal)
8200860-4	DR. RAFAEL GARCIA HERNANDEZ	(Suplente)

Agradeciendo de antemano las atenciones que se sirvan prestar a la presente, aprovecho para enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

DR. JOSE LEMUS RUIZ
DIRECTOR
INST. DE INVEST. METALURGICAS

INVESTIGACIONES
METALURGICAS

JLR/letg'



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALURGICAS

Morelia, Mich., Febrero 10 del 2009.

**C. ING. ARMANDO LOPEZ MIRANDA
P R E S E N T E**

La dirección del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, hace de su conocimiento que le ha sido aprobada la tesis titulada:

***“MODELACION MATEMATICA Y FISICA DE UN NUEVO DISEÑO DE
DISTRIBUIDOR DE COLADA CONTINUA”,***

A fin de obtener el Grado de Maestro en Metalurgia y Ciencias de los Materiales. Por tal razón se le autoriza a usted la ***Impresión Definitiva*** de la misma, en base al oficio recibido de la mesa sinodal para realizar su examen.

Sin otro particular por el momento, me es grato saludarle muy cordialmente.

Atentamente

DR. JOSE LEMUS RUIZ
DIRECTOR
INST. DE INVEST. METALURGICAS

JLR/letg'

DEDICATORIA

A mis Padres:

José Luis López López

Silvia Miranda Martínez

A mis abuelos:

Antonia Martínez Salceda[†]

Francisco Miranda Cortés[†]

José López López[†]

Maria de J. López Gómez

En especial a la memoria de mi tía[†]:

Edith Miranda Martínez.

AGRADECIMIENTOS

- **A mis padres:** Por todo el cariño, comprensión y apoyo que me han brindado toda mi vida y sobre todo en los momentos difíciles de esta maestría. Gracias por siempre ser el modelo a seguir. Espero poder llegar a retribuirles todo o que me han dado y sobre todo llegar a ser la mitad de las grandes personas que son.
- **A mis Hermanos (Karina y José Luis):** Por ser mis mejores amigos, gracias por hacerme la vida más fácil en esta ciudad.
- **A Laura:** Por brindarme su cariño sin importar la distancia, gracias por escucharme siempre y por ser la mujer de mi vida.
- **A mis amigos del Instituto:** Emerson, Cuauhtémoc, Silvino, Gildardo, Roberto, Gerardo, Engelbert y Héctor porque formamos un gran grupo y nos apoyamos en los momentos buenos y malos.
- **A mis asesores,** Dr. Gerardo Barrera Cardiel y Dr. José de Jesús Barreto Sandoval, por la confianza depositada en mi, por todos los consejos y asesorías. Gracias sobre todo por brindarme su amistad.
- **Al personal académico y administrativo del Instituto,** en especial al Dr. Ramiro Escudero García, Dr. Guillermo Carreón Garcidueñas y Dr. José Lemus Ruiz, por todo el apoyo brindado durante los últimos meses.
- **A CONACYT, COECYT, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Tecnológico de Morelia** por todo el apoyo brindado durante la realización de este proyecto.

INDICE GENERAL

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABLAS.	x
NOTACION.	x
RESUMEN	1
JUSTIFICACION	3
OBJETIVOS.....	4
HIPOTESIS.	4
CAPITULO I INTRODUCCION	5
1.1 El Distribuidor de Colada.	5
1.2 Modelación Matemática.....	6
1.3 Modelación Física.....	8
CAPITULO II REVISION BIBLIOGRAFICA.....	10
2.1 Antecedentes Históricos de la Colada Continua.	10
2.2 Descripción del Proceso de Colada Continua.	11
2.3 El Distribuidor de Colada Continua.....	13
2.3.1 Tipos de Distribuidores.	15
2.3.2 Efecto del Tamaño del Distribuidor.	17
2.3.3 Configuración Interna del Distribuidor.....	18
2.4 Modelación del Distribuidor de Colada.....	19
2.4.1 Modelación Física.	20
2.4.1.1 Criterios de Similitud.....	21
2.4.2 Distribución de Tiempos de Residencia.....	23
2.4.2.1 Curva C.....	24
2.4.2.2 Trazador.	25
2.4.3 Caracterización del Flujo de Fluidos en el Distribuidor de Colada.	25
2.4.4 Modelación Matemática.	28
2.4.4.1 Naturaleza del Flujo de Fluidos.....	28
2.4.4.2 Ecuación de Continuidad y de Navier-Stokes.....	29
2.4.4.3 Modelos de Turbulencia.....	31
2.4.4.3.a Modelo k- ϵ estándar.....	34

2.4.4.4 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).	35
2.4.4.4.a Generación de la Malla.	36
2.4.4.4 b Metodología de Solución.....	38
2.5 Efecto de la Curvatura en las Paredes del Distribuidor.	40
2.6 Resumen.....	41
CAPITULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL	43
3.1 Introducción.	43
3.2 Modelación Matemática.....	46
3.2.1 Dibujo de la Geometría.	47
3.2.2 Generación de la Malla.....	49
3.2.3 Condiciones de Borde y Consideraciones.....	50
3.2.4 Condiciones de la Simulación.....	51
3.2.5 Solución Numérica.	52
3.2.6 Simulación Matemática del Tiempo de Residencia.	53
3.3 Simulación Física.....	53
3.3.1 Construcción e Instalación del Equipo.	54
3.3.2 Instrumentación del Equipo.	56
3.3.2.1 Curva de Calibración.....	57
3.3.2.2 Trazador y Colorante.	59
3.3.3 Sistema de Adquisición de Datos.	59
3.3.3.1 Equipo de Medición de la Conductividad.	59
3.3.3.2 Tarjeta para la Digitalización de Señales.....	60
3.3.3.3 Software para la Digitalización y Tratamiento de las Señales Analógicas.	60
3.4 Distribución de Tiempos de Residencia y Caracterización del Flujo.	61
3.5 Experimentos.	67
3.6 Resumen.....	68
CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS.	69
4.1 Distribuidor de 60 Toneladas.....	69
4.1.1 Caracterización del Flujo del Distribuidor de 60 Toneladas.....	76
4.2 Distribuidor de 40 Toneladas.....	78
4.2.1 Caracterización del Flujo del Distribuidor de 40 Toneladas.....	82
4.3 Simulación Física.....	83

4.3.1 Visualización del Flujo.	84
4.4 Comparación Cuantitativa con el Modelo Matemático.	86
4.5 Reducción Longitudinal del Distribuidor.	88
4.6 Comparación con el Distribuidor Tipo Recto.	90
4.6.1 Comparación Cuantitativa.	91
CAPITULO V CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y	
ORIGINALIDAD DEL TRABAJO	93
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	97
ANEXO A CONCEPTOS DE LAS CONDICIONES DE SIMULACION	102
A.1 Criterio de Convergencia.....	102
A.2 Algoritmo SIMPLE.....	103
A.3 Factores de Relajación.	105
ANEXO B IMPORTANCIA DE LOS CORTES EN LA MALLA.	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema del proceso de colada continua.	12
Figura 2.2	Distribuidor de colada continua.	14
Figura 2.3	Tipos de distribuidores (vista superior).....	16
Figura 2.4	Modificadores de flujo.	19
Figura 2.5	Curva C.	25
Figura 2.6	Tipos de celdas.	37
Figura 2.7	Algoritmo de solución a un problema CFD.	39
Figura 2.8	Vista superior del distribuidor Delta.....	40
Figura 2.9	Vista superior del distribuidor Delta curvado.	40
Figura 3.1	Distribuidor tipo recto.	43
Figura 3.2	Distribuidor cilíndrico propuesto.	44
Figura 3.3	Comparación de los distribuidores vistas isométrica (a) y lateral (b).	44
Figura 3.4	Esquema general de experimentación.	46
Figura 3.5.	Etapas de la Modelación Matemática.....	47
Figura 3.6	Vista isométrica del distribuidor y sus cortes.....	48
Figura 3.7	Ambiente de Gambit®.....	48
Figura 3.8	Mallado computacional híbrido (vista isométrica).	49
Figura 3.9.	Mallado híbrido (vista frontal plano longitudinal central.).....	50
Figura 3.10	Etapas de la simulación física.	54
Figura 3.11	Equipo experimental utilizado en la simulación física.....	55
Figura 3.12	Tanques de plástico que simulan ollas de colada.	56
Figura 3.13	Configuración del transductor de conductividad.....	57
Figura 3.14	Disposición de los transductores de conductividad en el modelo.	57
Figura 3.15	Curvas de calibración.....	58
Figura 3.16	Conductívimetro Tacussel.....	59
Figura 3.17	Tarjeta para la digitalización de señales analógicas.	60
Figura 3.18	Pantalla principal del programa para la digitalización de señales.	61
Figura 3.19	Estructura del programa para la digitalización de señales.	61

Figura 3.20	Estructura gráfica del filtrado y normalización.	64
Figura 3.21	Estructura gráfica para el cálculo del parámetro de dispersión.	64
Figura 3.22	Subrutina para la aplicación del modelo de dispersión.	65
Figura. 3.23	Subrutina para el cálculo del volumen muerto.....	65
Figura 3.24.	Subrutina para el cálculo del volumen pistón.	66
Figura 3.25	Estructura gráfica del programa para caracterizar el flujo de fluidos.....	66
Figura 3.26	Pantalla principal del programa para caracterizar el flujo de fluidos.....	67
Figura 3.27	Modificación al distribuidor propuesto.	67
Figura 4.1	Comportamiento del fluido a lo largo del distribuidor. (plano longitudinal central)	70
Figura 4.2	Comportamiento del fluido alrededor de la zona de entrada.	70
Figura 4.3	Comportamiento del fluido en el casquete semiesférico del distribuidor.	71
Figura 4.4	Comportamiento del fluido en un plano longitudinal cercano a la pared	71
Figura 4.5.	Comportamiento del fluido en la zona de entrada (plano central transversal)	72
Figura 4.6.	Comportamiento asimétrico del fluido sobre la superficie libre.....	72
Figura 4.7	Comportamiento del fluido sobre la superficie libre	73
Figura 4.8	Flujo divergente en el plano transversal a la entrada.	74
Figura 4.9	Flujo divergente en la zona de la entrada (superficie libre).	74
Figura 4.10.	Comportamiento asimétrico del modelo $k - \varepsilon$ realizable en los casquetes semiesféricos (superficie libre).	75
Figura 4.11.	Contornos de velocidad en el plano longitudinal central.	76
Figura 4.12.	Distribución de tiempos de residencia simulada matemáticamente para la capacidad de 60 toneladas.	77
Figura 4.13.	Comportamiento asimétrico en la superficie libre del	78
	distribuidor de 40 toneladas.....	78

Figura 4.14.	Comportamiento del fluido en el plano transversal a la entrada, (distribuidor de 40 toneladas).	79
Figura 4.15.	Comportamiento del fluido sobre el plano longitudinal central.....	79
Figura 4.16	Comportamiento del fluido en la zona del casquete semiesférico.	80
Figura 4.17.	Comportamiento del acero en la zona del casquete semiesférico, (Plano superior).	80
Figura 4.18.	Comparación de los contornos de velocidad para las dos capacidades. (Plano longitudinal).	81
Figura 4.19.	Efecto de la disminución de nivel del acero en la dinámica del acero. (plano transversal a la entrada).	81
Figura 4.20.	Contornos de velocidad en el plano longitudinal central (40 toneladas).....	82
Figura 4.21.	Curva de Distribución de Tiempos de Residencia (40 toneladas).....	82
Figura 4.22	Comparación de las curvas de Distribución de Tiempos de Residencia obtenidas físicamente para las dos salidas.	84
Figura 4.23.	Impacto contenido del fluido con el fondo del distribuidor.	85
Figura 4.24	Comportamiento no simétrico del fluido en el distribuidor.	86
Figura 4.25.	Fenómeno de circuito corto modelado matemática y físicamente.	86
Figura 4.26.	Comparación de las curvas de Distribución de Tiempos de Residencia obtenidas matemática y físicamente.....	87
Figura 4.27	Reducción longitudinal del distribuidor.	88
Figura 4.28.	Vectores de velocidad en el casquete semiesférico para el distribuidor reducido.	89
Figura 4.29.	Comparación de los contornos de velocidad del distribuidor reducido y sin reducir longitudinalmente.	89
Figura 4.30.	Comparación del impacto del chorro de entrada con el fondo en el distribuidor tipo recto y el distribuidor propuesto	91
Figura 4.31.	Comparación del impacto en las paredes laterales del distribuidor tipo recto y el distribuidor propuesto.	91
Figura 5.1	Distribuidor modificado para futuras investigaciones.	95

Figura A.1.	Celda hexaédrica.	102
Figura B.1.	Vista lateral del distribuidor sin cortes.....	106
Figura B.2	Malla distorsionada.	107
Figura B.3.	Vectores de velocidad resultantes de la simulación del sistema sin cortes geométricos.....	107
Figura B.4	Vista lateral del distribuidor con cortes geométricos.	108
Figura B.5	Malla sin distorsión por la implementación de cortes.....	108
Figura B.6	Vectores de velocidad resultantes de simular el sistema con los cortes apropiados.	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.I.	Propiedades físicas del agua y del acero.	20
Tabla 2.II.	Comparación de volúmenes entre distribuidores delta y curvo.	41
Tabla 3.I	Experimentos efectuados.	68
Tabla 4.I.	Caracterización matemática del flujo de fluidos para el distribuidor de 60 toneladas	77
Tabla 4.II.	Caracterización matemática del flujo de fluidos (40 Toneladas).	83
Tabla 4.III.	Caracterización de flujo de fluidos obtenida de la simulación física.	84
Tabla 4.IV.	Comparación de las fracciones de volumen obtenidas física y matemáticamente.	87
Tabla 4.V.	Caracterización del flujo de fluidos para el distribuidor reducido longitudinalmente.	90
Tabla 4.VI.	Comparación de las fracciones de flujo entre los dos diseños de distribuidor.	92

NOTACION

c = Concentración.

C = Concentración adimensional.

$C_{\max}$ = Concentración máxima en la curva C .

C_{θ} = Concentración obtenida al aplicar el modelo de dispersión.

D = diámetro de la buza.

$\mathcal{D}$ = Difusividad.

g = Gravedad.

H = Nivel del acero en el distribuidor.

L = Longitud.

P = Presión.

Q = Flujo volumétrico.

Q_a = Flujo volumétrico a través de la región activa.

S_{ct} = Número turbulento de Schmidt = $\mu_t / \rho \mathcal{D}$

t = tiempo.

$\bar{t}$ = Tiempo medio de residencia = V/Q

v = Velocidad.

V = Volumen.

W = Ancho del distribuidor.

$\frac{D}{vL}$ = Parámetro de Dispersión.

Letras Griegas

α = Factor de relajación.

β = Coeficiente de expansión volumétrica.

ε = Disipación de energía cinética turbulenta.

η = Viscosidad cinemática.

θ = Tiempo Adimensional = $t/\bar{t}$

$\bar{\theta}$ = Tiempo promedio de Residencia.

$\bar{\theta}_c$ = Tiempo promedio de residencia calculada hasta $\theta = 2$.

$\theta_{\max}$ = Tiempo adimensional al cual se registra la concentración máxima.

$\theta_{\min}$ = Tiempo adimensional al cual se registra la primera aparición del trazador.

κ = Energía cinética turbulenta.

λ = Factor de escala geométrico.

μ = Viscosidad molecular.

ρ = Densidad.

σ = Tensión Superficial.

σ^2 = Varianza adimensional de la curva RTD.

ω = Disipación específica de la energía cinética.

Subíndices.

dv = Muerto.

in = Entrada.

m = Modelo.

max = Máximo.

min = Mínimo.

mv = Mezclado.

p = Prototipo.

pv = Pistón.

t = Turbulento.

RESUMEN

La colada continua es el proceso por el cual se solidifica más del 90% del acero producido a nivel mundial. Es un proceso que básicamente consta básicamente de tres etapas principales, el vaciado de la olla de refinación secundaria, a través del distribuidor y el molde de colada donde se extrae calor para que el acero solidifique. El distribuidor es la última etapa de la colada continua antes de que el acero sea solidificado por lo que constituye la última oportunidad para la eliminación de inclusiones y para la homogeneización del acero. La principal función del distribuidor es la de suministrar y distribuir el acero fundido a un flujo constante a los moldes de colada, sin embargo ante los requerimientos de calidad mas exigentes en los últimos años, el distribuidor ha adquirido una gran importancia en cuanto a la eliminación de inclusiones se refiere.

El diseño del distribuidor está enfocado al control del flujo de fluidos para proporcionar las mejores condiciones de flujo con el propósito de optimizar las diferentes operaciones metalúrgicas llevadas a cabo en esta etapa. En la última década la tendencia para lograr esto, ha sido la colocación de dispositivos controladores de flujo dentro del distribuidor, los cuales modifican de manera benéfica la fluidinámica del sistema.

Tradicionalmente el distribuidor de colada se refiere a un recipiente rectangular. En el presente trabajo se estudió la fluidinámica de un innovador diseño de distribuidor de colada continua, consistente en un cuerpo cilíndrico con extremos semiesféricos sin el uso de dispositivos modificadores de flujo. La investigación se llevó a cabo empleando dos técnicas complementarias, la simulación matemática y la física.

La simulación matemática, que consiste en la resolución numérica de las ecuaciones del flujo de fluidos turbulento, se llevó a cabo en el paquete de simulación Fluent®. El objetivo de la simulación matemática es obtener la distribución detallada de las velocidades del fluido en todo el sistema, además de caracterizar el flujo del distribuidor. En la simulación física por medio de la inyección de un trazador y de la obtención de la curva de distribución de

tiempos de residencia es posible validar los resultados obtenidos en la simulación matemática.

Los resultados obtenidos de ambas simulaciones demostraron que la curvatura del sistema tiene un efecto favorable sobre el flujo de fluidos principalmente en la zona de la entrada. La curvatura provoca que el impacto del chorro de entrada del acero disminuya y el fluido tienda a subir a través de las paredes de forma contenida. A su vez, los casquetes semiesféricos constituyen regiones de baja velocidad, en las que se encuentra gran parte del volumen muerto presente en el sistema, sin embargo, esta forma geométrica disminuye el impacto con las paredes laterales del distribuidor y pudiera provocar la desaparición del fenómeno de vorticidad.

La caracterización del flujo de fluidos, cuyo objetivo es la determinación de las fracciones volumétricas de flujo pistón, mezclado y muerto del sistema, matemáticamente se hizo con un distribuidor de 60 toneladas y además se llevó otra serie de experimentos tanto matemática como físicamente para una capacidad de 40 toneladas. Se observó que los resultados arrojados por ambas técnicas concuerdan aceptablemente, validando el modelo y las condiciones utilizadas en la modelación matemática.

Para evaluar el comportamiento fluidinámico del distribuidor propuesto se comparó con el distribuidor tipo recto^[6]. El parámetro más crítico, para llevar a cabo esto, es la fracción de volumen muerto presente en cada sistema, observándose que el valor de esta fracción, es prácticamente la misma que la reportada para el distribuidor tipo recto^[6]. Sin embargo la fracción de volumen pistón es mayor respecto al distribuidor tipo recto lo cual es un claro indicativo del efecto inhibitor de la forma cóncava del distribuidor. En base a estos resultados se llevó acabo una última etapa de experimentación, únicamente matemática, reduciendo el distribuidor longitudinalmente, reduciéndose la fracción de volumen muerto en un 15% aproximadamente.

JUSTIFICACION

Actualmente el acero es el material más utilizado por el ser humano. El acero está presente en cualquier actividad que el hombre desarrolle, como por ejemplo en el área de la construcción, medios de transporte, suministro de energía, producción, etc.

La producción mundial de acero se ha incrementado sustancialmente durante los últimos años, alcanzando en el 2007 1.45 billones de toneladas producidas. En México, la producción de acero en el año 2007 alcanzó 17.6 millones de toneladas, que representa el 2.2% del producto interno bruto total, lo cual es un claro indicativo de la importancia del desarrollo de la industria siderúrgica en el país. ^[1] Cabe mencionar que del acero que se produce en México el 99.7 % se produce por colada continua.

Este aumento en la productividad, aunado a parámetros de calidad más estrictos, obliga a la puesta en marcha de tecnologías innovadoras y factibles en la industria siderúrgica, por lo que resulta necesario el desarrollo de infraestructura e investigación para que nuestro país pueda satisfacer las demandas de acero futuras.

Durante los últimos años, la investigación de los fenómenos que tienen lugar en el distribuidor de colada continua ha cobrado mucha importancia, ya que el distribuidor constituye la última etapa en la colada continua antes de que el acero sea solidificado y por lo tanto se está cambiando la naturaleza de este dispositivo de ser un simple contenedor del metal a la categoría de reactor.

Todas las investigaciones buscan optimizar las condiciones del flujo de fluidos dentro del distribuidor y de esta forma contribuir a la obtención de aceros más limpios y de mejor calidad, no siendo el presente trabajo la excepción. En la presente investigación, se propone un diseño innovador de un distribuidor de colada buscando tener condiciones de flujo que favorezcan la flotación de inclusiones, disminuyan la turbulencia y que eliminen al máximo el fenómeno de la vorticidad y del circuito corto.

OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO.

Estudiar el comportamiento dinámico del acero líquido dentro del distribuidor de colada continua con la geometría propuesta y compararlo con el distribuidor convencional para determinar sus ventajas en las distintas operaciones metalúrgicas llevadas a cabo.

OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Determinar los patrones de flujo de fluidos por medio de la modelación matemática que involucre la geometría del nuevo distribuidor.
- Construir un modelo físico a escala para caracterizar el flujo de fluidos y de esta forma validar los resultados de la modelación matemática.
- Determinar el efecto de las variables operacionales y dimensionales del sistema sobre el comportamiento dinámico del acero en el distribuidor de colada continua y el posible aumento en su productividad.

HIPOTESIS.

La hipótesis en la que se basa el presente trabajo establece lo siguiente: “La forma geométrica del distribuidor propuesto, cilíndrica con extremos semiesféricos, disminuirá los gradientes de velocidad del chorro de entrada, conteniendo así la turbulencia, reduciéndose el impacto con las paredes del distribuidor. Lo anterior producirá un mejor comportamiento del flujo de fluidos ayudando a obtener un acero más limpio y más homogéneo, tanto en temperatura como en composición.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 El Distribuidor de Colada.

La colada continua es un proceso para transformar el metal líquido en sólido en forma continua. La colada continua constituye el proceso más eficiente para solidificar grandes volúmenes de metal en formas simples para su posterior procesamiento. Por esta vía se produce cerca del 90% del acero del mundo

El distribuidor, en el proceso de colada continua, es un importante enlace entre la olla (un equipo de operación por lotes) y el molde de colada (que se distingue por ser un dispositivo de operación continua). En un principio el distribuidor fue considerado como un equipo diseñado para suministrar y distribuir el acero líquido a los diferentes moldes de colada a una velocidad constante, además de actuar como reserva durante los cambios de grado.

En las últimas décadas ante el aumento de los requerimientos de calidad del acero y el énfasis en la reducción de costos de producción, el distribuidor de colada ha evolucionado buscando convertirse en un reactor refinador de acero, ya que constituye la última etapa por la que pasa el metal líquido antes de ser solidificado. Por lo tanto, actualmente el diseño de un distribuidor de colada está encaminado a permitir llevar a cabo varias operaciones metalúrgicas como la separación y flotación de inclusiones, el control de la temperatura y homogeneización térmica y de la composición del acero.

La eficiencia y optimización de estas operaciones requieren del control del flujo de fluidos dentro del distribuidor. Si el flujo del metal en el distribuidor no es adecuadamente controlado, puede deteriorar la calidad del acero producido en la olla. En los últimos años la tendencia general para controlar el flujo de fluidos en el distribuidor ha sido la colocación de dispositivos modificadores de flujo, los cuales son artefactos de geometría simple, hechos de material refractario resistente a altas temperaturas. Entre los principales

dispositivos modificadores de flujo se encuentran el inhibidor de turbulencia, las placas de impacto y las represas, además de las cortinas de aire.

Debido a las altas temperaturas de operación en el distribuidor de colada (alrededor de los 1600° C) y a la opacidad del acero, sumado a las dificultades técnicas de probar un prototipo en planta, es muy difícil estudiar el comportamiento del sistema directamente; por tal motivo se han desarrollado novedosas técnicas de estudio que ofrecen resultados de gran validez como la simulación matemática y física.

En el presente trabajo se estudia, mediante simulación matemática y física, la fluidinámica de un nuevo diseño de distribuidor, de una geometría cilíndrica con extremos semiesféricos, sin nada en el interior. Teóricamente ésta geometría mejorará las condiciones del flujo de fluidos del distribuidor y de esta forma las operaciones metalúrgicas llevadas a cabo en el distribuidor serán más eficientes.

1.2 Modelación Matemática.

La modelación matemática es una excelente alternativa para estudiar el comportamiento del flujo de fluidos de manera detallada en el distribuidor de colada continua. Esta técnica se fundamenta en la solución numérica de las ecuaciones gobernantes del sistema por medio de métodos numéricos que utilizan algoritmos basados en diferencias finitas o volumen finito.

El flujo de fluidos en el distribuidor de colada continua es sumamente complejo, ya que se tiene una región de alta turbulencia, localizada en la zona de entrada, y el resto del distribuidor que corresponde a una zona de transición. Para el modelado del flujo turbulento, caracterizado por altos gradientes de velocidad, se hace uso de un conjunto de ecuaciones denominadas modelos de turbulencia. Desafortunadamente no existe un modelo de turbulencia que sea aplicable a todos los problemas. La elección del modelo de turbulencia dependerá de los fenómenos involucrados en el sistema, el nivel de precisión requerido y los recursos computacionales con los que se cuente. En el estudio del flujo de fluidos, el modelo más utilizado por los investigadores, en los últimos años, es el modelo $k - \varepsilon$ estándar, descrito en la sección 2.4.4.

Las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos en el distribuidor de colada continua son la ecuación de continuidad, las ecuaciones de Navier-Stokes y las ecuaciones del modelo de turbulencia. Todas éstas son ecuaciones diferenciales parciales no lineales, por lo cual en la mayoría de los problemas de flujo de fluidos no es posible resolverlas analíticamente.

La Dinámica de Fluidos Computacional es una herramienta de ingeniería que permite la simulación de cualquier tipo de problema que involucre fenómenos de transferencia de calor, materia y momento. La metodología de solución de la Dinámica de Fluidos Computacional se fundamenta en la sustitución del dominio continuo del sistema por uno discreto utilizando una malla o retícula formado por puntos o celdas. A partir de las condiciones iniciales y de frontera, se resuelven las ecuaciones diferenciales parciales, que son sustituidas por ecuaciones algebraicas, en cada uno de los nodos del sistema reticular. La solución de este conjunto de ecuaciones algebraicas involucra el uso de métodos iterativos. Existen un gran número de paquetes comerciales disponibles para cálculos computacionales de dinámica de fluidos entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Fluent
- Phoenix
- Flow-3D
- Star-3D.

El software utilizado en esta investigación es **Fluent[®]**, el cual utiliza la técnica de discretización llamada volumen finito. Esta técnica tiene la ventaja de que se puede adaptar a cualquier tipo de mallado sea o no estructurado. En la presente investigación primeramente se dibujo la geometría y se llevó a cabo el mallado en el preprocesador Gambit[®]. Además en este mismo software se asignan las condiciones frontera del sistema. Una vez hecho esto, se exporta el archivo hacia Fluent[®], donde se seleccionan las ecuaciones gobernantes del sistema, el fluido de trabajo, agua en este caso y demás parámetros. Una vez resuelto el sistema de ecuaciones en estado estable se analiza el comportamiento del fluido por medio de vectores y contornos de velocidad. Para la obtención de las curvas de Distribución de Tiempos de Residencia en Fluent[®] es necesario simular el sistema en estado inestable, inyectando un

trazador virtualmente al chorro de entrada y monitoreando su concentración a las salidas del distribuidor.

1.3 Modelación Física.

La modelación física permite visualizar el comportamiento del flujo de fluidos en el distribuidor ya que emplea modelos de acrílico, generalmente a escala, y agua como fluido de trabajo debido a que posee una viscosidad cinemática similar a la del acero. La correcta representación del flujo en un distribuidor a escala implica la existencia de algunas correlaciones entre algunas variables del modelo y del distribuidor de tamaño natural. Estas relaciones son llamadas criterios de similitud y para el estudio del flujo de fluidos en el distribuidor implica la similitud geométrica, dinámica, cinemática y térmica.

Para evaluar el desempeño del flujo de fluidos en el distribuidor de colada, una de las técnicas experimentales más utilizadas es el análisis de la curva de distribución de tiempos de residencia. Típicamente se inyecta una cierta cantidad de un trazador en la corriente de entrada y se monitorea su concentración a la salida del distribuidor. Como trazador puede ser utilizado, cualquier sustancia de densidad semejante al agua, incluyendo sales, ácidos o colorantes. La curva normalizada del tiempo contra concentración es denominada curva C y de su análisis se obtiene la caracterización del flujo en el distribuidor utilizando los modelos de mezclado.

La caracterización del flujo se refiere a la determinación de las fracciones de flujo mezclado, pistón y muerto presentes en el sistema producto del comportamiento no ideal del flujo. La fracción de volumen muerto es el parámetro más crítico en la evaluación del funcionamiento del distribuidor de colada, debido a que el volumen muerto, caracterizado por un movimiento muy lento del fluido, no participa en los procesos de transferencia de calor y de masa que tienen lugar en el distribuidor, afectando la limpieza del acero y originando puntos fríos que pueden dar lugar a una solidificación prematura. Es por esta causa que cualquier diseño de un distribuidor de colada busca reducir la fracción de volumen muerto al mínimo.

Para esta parte de la investigación se utilizó un distribuidor a escala de un sexto construido de acrílico, agua como fluido de trabajo, KCl como solución trazadora y KMnO_4 como colorante. La obtención de las curvas de Distribución de Tiempos de Residencia se logra inyectando la solución trazadora al chorro de entrada monitoreando su conductividad en las salidas del sistema. Para este monitoreo se le adaptaron dos anillos de grafito a las buzas de salida. Además para la digitalización de las señales se utilizó el paquete Labview[®]. A partir de las curvas de Distribución de Tiempos de Residencia se logra caracterizar el flujo de fluidos y por lo tanto evaluar el funcionamiento del distribuidor.

CAPITULO II

REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Antecedentes Históricos de la Colada Continua.

Por más de un siglo el método tradicional para transformar el acero de su fase líquida a sólida fue mediante el uso de lingoteras. Las lingoteras son recipientes de paredes gruesas de acero fundido, abiertos de la parte superior e inferior y que son colocados sobre unas placas de hierro fundido que tienen una serie de canales o ramificaciones. Cada lingotera es llenada con acero líquido proveniente de la olla. Después de solidificado el acero, es retirada la lingotera y el lingote es llevado a una fosa de recalentamiento para su posterior procesamiento (laminado, forja, extrusión, etc.) para la obtención de productos semi- terminados o productos finales.

Fue hasta el siglo XIX cuando Henry Bessemer (1846) concibió la idea de solidificar acero de forma continua.^[2] En esta época solo se aplicó a la colada de metales no ferrosos con bajos puntos de fusión debido a los diversos problemas técnicos asociados con las altas temperaturas envueltas en la colada del acero. Sin embargo, R. M. Daelen^[2] en 1887, patentó un proceso para solidificar acero líquido de forma continua usando un molde refrigerado por agua abierto por la parte superior y por el fondo. En este proceso el chorro de acero líquido era vertido verticalmente dentro del molde sugerido, pasaba a través de una etapa de enfriamiento secundario y finalmente era retirado por medio de unos rodillos antes de ser cortado por medio de un soplete. Las características del proceso propuesto por Daelen son la parte integral de las máquinas modernas de colada continua del acero, por lo cual a este científico se le considera como el inventor de la colada continua.

Aún así, se tenían problemas considerables debido a la adherencia del acero solidificado a las paredes del molde. No fue hasta 1933 cuando Siegfried Junghans^[2] desarrolló y patentó un sistema de molde oscilatorio que resolvía el

problema de adherencia del acero solidificado. La primera planta piloto de colada continua fue construida en USA en 1938. A partir de 1950 el desarrollo tecnológico del proceso de colada continua del acero ha crecido de forma acelerada, convirtiéndolo en un proceso sumamente sofisticado y eficiente hasta llegar a ser en nuestros días la forma más utilizada en el mundo para producir acero.

Las principales ventajas de la colada continua respecto a la colada por lingotes son las siguientes: ^[2]

- Aumento del rendimiento. Por ejemplo se obtiene aproximadamente en palanquilla útil un 93% del peso en chatarra cargada a los hornos eléctricos de arco; en cambio en la colada por lingotes se obtiene un 83% del peso de chatarra cargada al horno. Actualmente se estima que el aumento en el rendimiento de la colada continua respecto la colada por lingotes es de aproximadamente el 11%.
- Reducción del consumo de energía al eliminarse una etapa de recalentamiento.
- Los costos de operación son menores, no así los costos de capital que son superiores a los requeridos en la instalación de un proceso de colada por lingotes. Una de las razones para reducir los costos de operación es que se eliminan dos etapas del proceso de colada por lingotes: obtención de lingotes y su laminación. Por ende se reduce el tiempo de procesamiento.
- Requiere menor mano de obra.
- Se reduce la pérdida de material debido al despunte de lingotes.
- Aumenta la calidad del producto así como su uniformidad.

2.2 Descripción del Proceso de Colada Continua.

El principio básico del proceso de colada continua del acero está basado en el vaciado del acero líquido verticalmente en el molde de cobre refrigerado con agua el cual está abierto en el fondo. La representación gráfica del proceso de colada continua se muestra en la figura 2.1

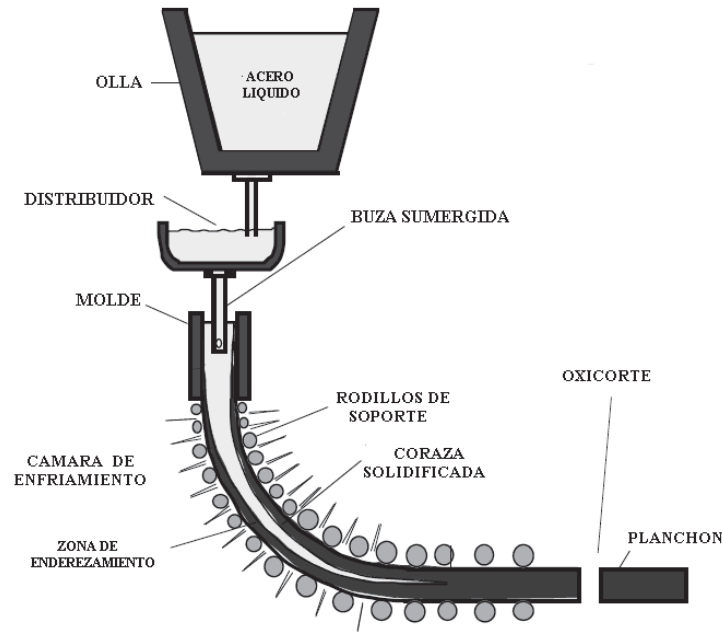


Figura 2.1 Esquema del proceso de colada continua. [3]

Este proceso comienza con el vaciado del acero líquido, proveniente del BOF o del horno de arco eléctrico, a la olla de refinación secundaria, donde se obtiene la composición química de acero deseada. El acero líquido es vaciado al distribuidor de colada por medio de una válvula de control y la corriente de acero es protegida por un tubo de refractario, llamado buza, para evitar la reoxidación del baño. Es muy común observar que se tiene más de una línea de colada operando en paralelo por lo que el distribuidor dosifica la cantidad de acero para cada línea. Además, el distribuidor debe de retener una cantidad mínima de metal, para mantener así el carácter continuo de la operación durante los cambios de olla.

El acero fluye a través del distribuidor y sale por medio de una buza sumergida en el molde sin fondo. Una vez en el molde, el acero solidifica contra las paredes, ya que éstas son enfriadas con agua, formándose una coraza sólida. El molde está sometido a un movimiento oscilatorio vertical para impedir la adhesión de la coraza a las paredes del molde. La coraza de acero es continuamente retirada del molde por medio de unos rodillos a una cierta velocidad llamada “velocidad de colada” la cual se fija de tal forma que se mantenga la operación en estado estable. Atomizadores de agua y/o aire rocían la barra de acero conforme ésta sale del molde, enfriándola aún más y

provocando que la coraza solidificada crezca hacia la parte central de la barra. Ya que el centro está totalmente solidificado la barra es cortada con oxiacetileno para obtener las dimensiones requeridas.

Existen diferentes tipos de procesos de colada dependiendo la forma y el tamaño de producto que se requieran. Estos productos suelen ser clasificados en tres tipos:

- Palanquilla. Son pequeñas secciones cuadradas entre 100-200 mm. de espesor, y hasta 150mm cuadrados, las cuales son roladas para obtener barras, clavos, ejes, etc. En su forma redonda tienen hasta 150 mm de diámetro.
- Tochos. Secciones rectangulares con un área mayor de 150mm cuadrados, y en un rango de 800mm de largo por 400mm de ancho. Tienen relaciones de aspecto de hasta 2. En su forma redonda tienen diámetros mayores de 150mm de espesor.
- Planchón. Secciones rectangulares de 50-250mm de espesor. Tienen relaciones de aspecto mayores a 2. El planchón de mayor tamaño colado en la actualidad tiene 2725 mm. de largo por 254 mm. de ancho.

2.3 El Distribuidor de Colada Continua.

En la colada continua del acero, el distribuidor tradicionalmente se refiere a un recipiente **rectangular** tipo “cajón de muerto” recubierto por material refractario, colocado entre la olla y el molde, diseñado para suministrar y distribuir acero líquido a diferentes moldes a una velocidad constante. ^[4] El número de moldes usualmente es de 1 a 2 para planchón, de 2 a 4 para la colada de tochos y de 4 a 8 para palanquillas. La velocidad de suministro de acero constante al molde se logra al conservar el nivel del líquido en el distribuidor sin variaciones significativas. En la figura 2.2 se puede observar algunos aspectos importantes del distribuidor.

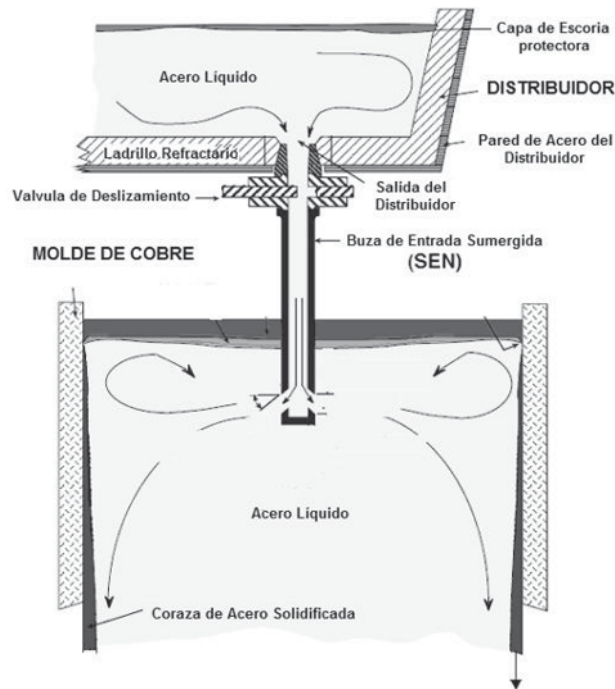


Figura 2.2 Distribuidor de colada continua. [3]

Ante la creciente demanda de aceros de mayor calidad, el distribuidor de ha adquirido una mayor importancia dentro de la colada continua, evolucionando hasta poder llegar a convertirse en un reactor de refinación del acero. Por lo que ahora se puede decir que el distribuidor cumple tres funciones básicas: [5]

- Actuar como reserva de acero durante los cambios de olla, manteniendo así el carácter continuo de la operación.
- Suministrar al molde de colada continua del flujo deseado, temperatura y composición uniformes.
- Contribuir en la flotación de inclusiones así como prevenir su formación durante el paso del acero por el distribuidor.

Un aspecto de suma importancia en esta etapa es el control del flujo de fluidos, de lo contrario el distribuidor se convierte en una fuente altamente contaminante. Es decir, es clave mantener y si es posible mejorar la calidad del acero proveniente de la refinación secundaria; pero nunca disminuirla ya que el distribuidor es la última etapa donde se puede llevar a cabo limpieza del acero antes de pasar al molde y ser colado.

Si las inclusiones permanecen en el producto, entonces se pueden formar defectos superficiales, tales como “astillas o esquirlas”, que durante las operaciones de rolado pueden causar concentración de esfuerzos locales, los cuales disminuyen su resistencia a la fatiga. La eficiencia de las operaciones de refinación en el distribuidor está íntimamente ligada a la naturaleza del flujo del acero líquido.

2.3.1 Tipos de Distribuidores.

En el transcurso de los años distintos tipos de distribuidores han sido diseñados y aplicados en la industria siderúrgica, todos buscando un fin común: mejorar la limpieza y por ende la calidad del acero. La forma geométrica del distribuidor es dictada algunas de las veces por el número de líneas o por el espacio disponible.

El diseño de un distribuidor es crítico y muy importante, considerando su aplicación específica como medio de refinación, control de temperatura, control químico, control fluidinámico, etc. Para seleccionar un diseño de distribuidor de colada es necesario considerar algunos aspectos:

- Productos a colar.
- Número de líneas y espacio disponible.
- Dispositivos de limpieza.
- Espesor de las líneas y su configuración.
- Costos necesarios para el distribuidor y sus accesorios.
- Capacidad para ampliar la producción.
- El rendimiento del proceso.

Dentro los diseños de distribuidor más utilizados, figura 2.3, se encuentran los siguientes:

- Tipo recto: Es el diseño más usado en la industria. Tiene paredes trapezoidales y su tamaño está dictado por el ancho, largo, alto y ángulo de sus paredes. Este diseño contiene una o varias líneas y es utilizado tanto para colar palanquilla como planchón.
- Tipo V. Es el diseño más usado en Europa, utiliza ollas de mayor capacidad.

- Tipo C. Este diseño resulta de la combinación del distribuidor tipo V y el tipo recto.
- Tipo T. Es utilizado para colar palanquilla y planchón.
- Tipo Delta. Es el más moderno de los distribuidores para colar palanquilla.
- TIPO H. Este tipo de distribuidor se ha usado en una nueva máquina para colar delgadas laminillas. Este diseño disminuye el acero de transición y evita las pérdidas de calor a través de las paredes, debido a las variaciones de nivel.

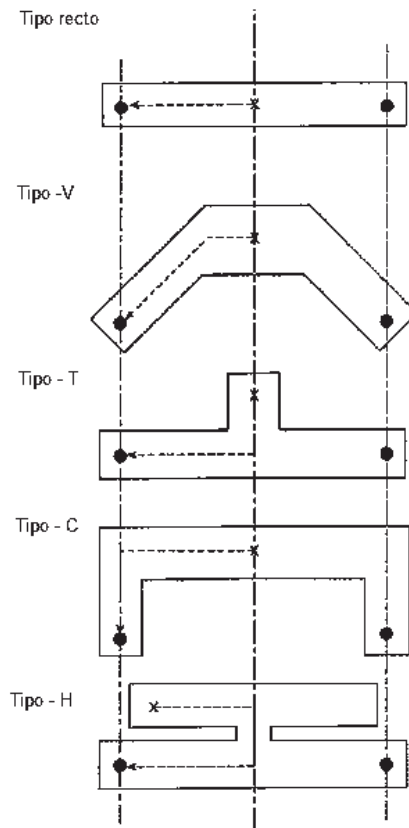


Figura 2.3 Tipos de distribuidores (vista superior). ^[4]

Independientemente de la perspectiva de flujo, diversos factores deben ser tomados en cuenta para hacer más efectivo el diseño de un distribuidor de colada:

- El distribuidor debe tener un nivel del líquido razonable así como su amplitud, para promover la flotación de inclusiones.

- Flujo boyante de la entrada hacia la salida para asistir la flotación.
- Flujo de acero con la menor turbulencia posible en la interfase líquido-escoria.
- Evitar el fenómeno de circuito corto.
- Tener la menor cantidad de zonas muertas.
- Óptimo tiempo de residencia del acero para permitir la flotación de inclusiones.
- Prevención del arrastre de escoria por vorticidad durante el vaciado de la olla al distribuidor.
- Aislante térmico y refractario adecuado.
- Mantener una atmósfera inerte durante los cambios de olla.
- Garantizar la absorción de las inclusiones a través de una escoria no corrosiva, preferentemente de carácter básico.

2.3.2 Efecto del Tamaño del Distribuidor.

El tamaño del distribuidor tiene un efecto significativo en el mejoramiento de la calidad del acero colado. A través de los años, el tamaño del distribuidor ha ido incrementándose gradualmente. Para una velocidad de colada dada, la cual determina el flujo volumétrico de acero a través del distribuidor, un volumen mayor del distribuidor resulta en un aumento del tiempo de residencia promedio. El incremento en el volumen induce a una reducción en el número de macro inclusiones obtenidas en el producto colado, particularmente durante el cambio de olla. El volumen del distribuidor puede ser incrementado aumentando su longitud, ancho o alto.

Tacke and Ludwig ^[4] estudiaron mediante modelación matemática la importancia del ancho y la altura del distribuidor en la remoción de inclusiones. Concluyeron que al aumentar la capacidad de un distribuidor tipo recto al incrementar su ancho la eficiencia en la remoción de inclusiones también se eleva, no así al incrementarse la altura del distribuidor ya que la eficiencia disminuye.

Sinha^[4] estudió el efecto de variar la relación del largo respecto al ancho (L/W) y de la altura respecto al ancho (H/W) en la remoción de inclusiones. El encontró que para relaciones pequeñas de (H/W), menores que 1, se tienen

excelentes resultados en la remoción de inclusiones, sin embargo el uso de este tipo de distribuidores se ve muy limitado por el fenómeno de vorticidad.

Si embargo, de acuerdo a otros estudios, el aumentar la capacidad del distribuidor aumentando el nivel del líquido ofrece algunas ventajas. Por ejemplo, mantener la velocidad de colada sin disminuir el nivel de forma significativa durante el cambio de olla. Además de aumentar la productividad del proceso, incrementando la velocidad de colada, sin sacrificar la calidad del producto final. ^[4]

2.3.3 Configuración Interna del Distribuidor.

El distribuidor de colada continua tiene varias funciones como proveer al molde de colada continua del flujo deseado, temperatura y composición uniformes y una baja cantidad de inclusiones. La tendencia general para lograr estos objetivos ha sido la de incrementar la capacidad del distribuidor, sin embargo, actualmente se ha optado por la colocación de dispositivos modificadores de flujo en el distribuidor para lograr esto. El aumento en la capacidad del distribuidor puede provocar efectos opuestos a los esperados. ^[6-8]

Los dispositivos modificadores de flujo son artefactos, de geometría simple, hechos de material refractario resistente a altas temperaturas. El objetivo de los controladores de flujo es modificar de manera benéfica el flujo del acero, reduciendo el volumen muerto, disminuyendo la turbulencia y redireccionando el flujo, para lograr obtener un mayor tiempo de residencia del acero en el distribuidor para que de tiempo suficiente para la flotación de inclusiones no metálicas. Dentro de los controladores de flujo podemos mencionar los inhibidores de turbulencia, las cortinas de argón, las placas de impacto, las represas (baffles) con o sin perforaciones, etc. El inhibidor de turbulencia es un dispositivo ubicado en el fondo del distribuidor exactamente en dirección del chorro de entrada, tiene la finalidad de disminuir la turbulencia provocada por la fuerza de inercia del chorro de acero y evitar el “salpicadero” y con ello la disminución de la erosión del refractario, además de aumentar el tiempo de residencia. Las cortinas de burbujas de argón incrementan el mezclado, promueven la aglomeración y flotación de inclusiones. ^[6-8]

Los modificadores de flujo darán los resultados deseados únicamente para determinadas condiciones, por ejemplo las dimensiones físicas, diseño y localización dentro del distribuidor, además de la combinación entre ellos, etc., ejerciendo una gran influencia en la Distribución de Tiempos de Residencia.^[6,8] Además de los modificadores de flujo, la configuración interna también involucra el estudio de la ubicación óptima de las buzas de salidas así como de la distancia de inmersión de la buza de entrada en el distribuidor.^[9] En la figura 2.4 se puede apreciar el distribuidor tipo recto con algunos modificadores de flujo, como el inhibidor de turbulencia y las represas.

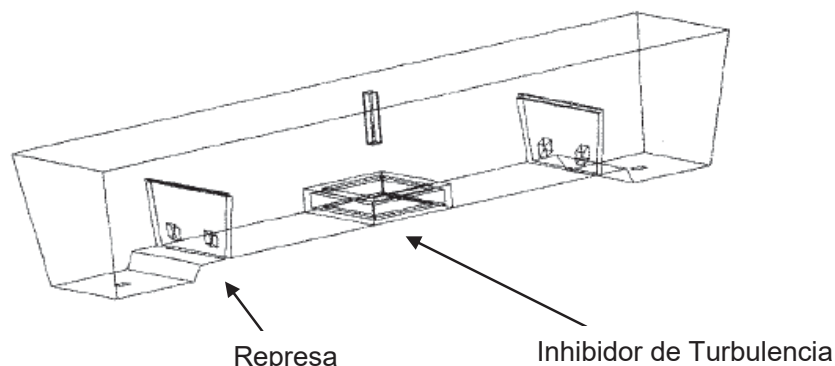


Figura 2.4 Modificadores de flujo.^[6]

2.4 Modelación del Distribuidor de Colada Continua.

Durante las últimas tres décadas la producción de acero vía colada continua se ha incrementado sustancialmente. Al mismo tiempo que este incremento en la producción, los requerimientos en cuanto al control de la composición, temperatura y limpieza de los productos terminados son más estrictos. Por esta razón, durante las últimas dos décadas se han hecho muchos esfuerzos por los investigadores alrededor del mundo para explotar totalmente el potencial del distribuidor de colada como un reactor. Los diferentes fenómenos investigados en el distribuidor son^[5]:

- Flujo de fluidos.
- Turbulencia.
- Distribución de Tiempos de Residencia.
- Flotación de Inclusiones.
- Mezclado y cambio de grado.
- Transporte de Energía Térmica.

La interacción entre la temperatura, la composición y el flujo de fluidos determinará la eficiencia del proceso en términos de calidad y productividad. La condición que guarde el flujo de fluidos afectará las pérdidas de calor del sistema, la eficiencia de la flotación de inclusiones, y el grado de reoxidación que ocurre por el contacto atmosférico durante las operaciones de vaciado. A su vez para el estudio de estos fenómenos las principales variables que han sido objeto de estudio en el distribuidor son:

- Dimensiones, tamaño e inclinación de las paredes del distribuidor.
- Diseño del distribuidor.
- Tipos de modificadores de flujo.
- La corriente de entrada.
- Agitación electromagnética.
- Agitación por gases.
- Calentamiento auxiliar.

2.4.1 Modelación Física.

La visualización del flujo en un distribuidor real o en uno en planta piloto es difícil debido a las altas temperaturas, a la opacidad del acero líquido y al gran tamaño de los distribuidores industriales. Una excelente opción para realizar las investigaciones en el distribuidor lo constituye la modelación física. En ésta, frecuentemente se trabaja con modelos a escala reducida, además que el fluido de trabajo es agua, debido a que es un medio muy barato, transparente, fácil de manipular, y principalmente porque posee una viscosidad cinemática casi idéntica a la del acero. Las propiedades tanto del acero como del agua se pueden apreciar en la tabla 2.I. ^[5] Otro de los objetivos de la simulación física es validar la modelación matemática para un sistema en particular.

Tabla 2.I. Propiedades físicas del agua y del acero.

Propiedades	Agua (20° C)	Acero(1600° C)
Viscosidad molecular (μ), kg/(m•s)	0.001	0.0064
Densidad (ρ) kg/m ³	1000	7200
Viscosidad cinemática ($\eta=\mu/\rho$)	10 ⁻⁶	0.913*10 ⁻⁶
Tensión superficial (σ) N/m	0.073	1.6

Entre los principales aspectos de flujo de fluidos estudiados en el distribuidor, mediante la modelación física sobresalen:

- 1) El efecto del chorro de entrada sobre las paredes durante el llenado del distribuidor.
- 2) El efecto de la turbulencia sobre la superficie libre.
- 3) La visualización del flujo en el distribuidor por medio de un trazador.
- 4) El estudio de la Distribución de Tiempos de Residencia del fluido.
- 5) Flotación de inclusiones.
- 6) Efecto de los modificadores de flujo, así como de la vorticidad.

2.4.1.1 Criterios de Similitud.

Para poder aplicar los datos obtenidos experimentalmente en un modelo, a un prototipo de tamaño real, se necesita la existencia de ciertas correlaciones constantes, de determinadas variables, entre el modelo y el prototipo. Dichas correlaciones son llamadas criterios de similitud. Para el flujo de fluidos en el distribuidor, las condiciones de similitud consideradas son: similitud geométrica, cinemática, dinámica y térmica. [4, 5, 10]

Similitud geométrica.

La similitud geométrica requiere que el modelo y el prototipo sean de la misma forma, y que todas las dimensiones longitudinales del modelo se relacionen con las dimensiones correspondientes del prototipo por medio de un factor de escala constante.

$$L_m = \lambda L_p \quad (2.1)$$

Donde el subíndice m y p se refieren al modelo y al prototipo (tamaño y condiciones reales) y λ se conoce como el factor de escala longitudinal.

Similitud cinemática

Representa la similitud de movimiento. Dos flujos son cinemáticamente similares cuando las velocidades en puntos correspondientes están en la misma dirección y se relacionan en magnitud mediante un factor de escala constante.

Similitud dinámica.

Representa la similitud de fuerzas actuando en ambos sistemas las cuales aceleran o retardan el movimiento de un elemento de fluido en el distribuidor. De acuerdo con este criterio, las fuerzas actuando a un tiempo y posición determinados en el distribuidor deben mantener una correlación fija con las fuerzas actuando en el prototipo. Las fuerzas de mayor importancia que gobiernan el flujo de fluidos en los distribuidores son las fuerzas inerciales, gravitacionales y viscosas. Los grupos adimensionales que relacionan estas fuerzas son:

$$\text{No. de Froude} = Fr = \frac{v^2}{gL} = \frac{\text{Fuerzas de Inercia}}{\text{Fuerzas Gravitacionales.}} \quad (2.2)$$

$$\text{No. de Reynolds} = Re = \frac{Lv\rho}{\mu} = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} \quad (2.3)$$

$$\text{No. de Weber} = We = \frac{\rho v^2 L}{\sigma} = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de tensión superficial}} \quad (2.4)$$

Similitud Térmica.

Representa la similitud del efecto de las fuerzas causadas por la diferencia de temperaturas. Para la similitud térmica, los efectos de la transferencia de calor del modelo y del prototipo deben de estar relacionados por un factor de escala. Este criterio solamente se utiliza cuando se modela en estado anisotérmico.

$$\text{No. de Tundish} = Tu = \frac{Re^2}{Gr} = \frac{v^2}{\beta L g \Delta T} = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de flotación}} \quad (2.5)$$

Selección de los criterios de similitud.

Para simular de la manera más confiable un modelo de distribuidor es necesario mantener los criterios de similitud mencionados anteriormente entre el modelo y el prototipo. El primer paso es el cumplir con la similitud geométrica, la cual depende de la complejidad de la geometría del sistema. El principal problema radica en cumplir íntegramente con la similitud dinámica, ya

que es imposible conservar los criterios de similitud de Reynolds y Froude. Como consecuencia de esto uno de los criterios debe ser ignorado.

La similitud de Reynolds implica:

$$\left(\frac{\nu L}{\eta}\right)_m = \left(\frac{\nu L}{\eta}\right)_p \quad (2.6)$$

η = viscosidad cinemática. Por lo que se puede reescribir como:

$$V_m \approx \left(\frac{1}{\lambda}\right) V_p \quad (2.7)$$

Donde λ es el factor de escala longitudinal.

La similitud de Froude expresa:

$$\left(\frac{v^2}{gL}\right)_m = \left(\frac{v^2}{gL}\right)_p \quad (2.8)$$

Por lo tanto:

$$v_m = \sqrt{\lambda} v_p \quad (2.9)$$

Al observar las ecuaciones (2.7) y (2.9) es claro que solamente para modelos a escala completa (igual a 1) se pueden satisfacer el criterio de similitud de Froude y el de Reynolds. En sus investigaciones, Sahai y Burvai^[4,5], así como Singh y Koria^[4] concluyeron que bajo condiciones de flujo turbulento, la magnitud del número de Reynolds, independientemente de la geometría y tamaño del distribuidor, permanece prácticamente constante. Por lo anterior, en la gran mayoría de las investigaciones que se realizan con modelos a escala reducida se ha adoptado la similitud de Froude, como el criterio estándar de simulación obteniéndose resultados muy confiables.

2.4.2 Distribución de Tiempos de Residencia.

El tiempo de residencia de un elemento de fluido dentro de un reactor es definido como el tiempo que dicho elemento permanece dentro del reactor. Usualmente el flujo de fluidos en un distribuidor está acompañado por una distribución de tiempos de residencia de los diferentes elementos del fluido. La distribución de tiempos de residencia de la corriente del fluido se origina por el

hecho de que los distintos elementos que componen el fluido al seguir diferentes caminos a lo largo del distribuidor tardarán tiempos diferentes en pasar a su través. Únicamente los reactores con flujo pistón exhiben un único tiempo de residencia.^[11]

El análisis de la Distribución de Tiempos de Residencia (DTR) constituye la base para la caracterización del flujo de fluidos y de esta forma determinar cualitativamente la eficiencia en la flotación de inclusiones. Las curvas DTR son frecuentemente graficadas como concentración o temperatura adimensional, contra tiempo adimensional.^[12]

Para caracterizar el flujo no ideal por medio de la distribución de tiempos de residencia se hace uso de técnicas experimentales denominadas “técnicas estímulo-respuesta.” En este tipo de técnica el sistema se estimula mediante una perturbación y se observa su respuesta a este estímulo. Para la caracterización de flujos no ideales, el estímulo es un trazador en el fluido que entra al recipiente, mientras que la respuesta es una representación del trazador a la salida del reactor respecto al tiempo. Entre las técnicas de monitoreo de la señal de respuesta se encuentran las siguientes:^[13]

- Inyección de color, usando como cuantificador un colorímetro o una celda fotovoltáica.
- Inyección de algún ácido, empleando para su rastreo un pH-metro.
- Inyección de una solución salina, utilizando para su monitoreo un conductivímetro.
- Inyección de un colorante, y filmar la trayectoria del líquido con una cámara de alta velocidad.

2.4.2.1 Curva C.

Cuando la corriente de entrada de fluido que entra al recipiente no contiene trazador alguno, y le imponemos una señal en impulso idealizada de trazador (señal trazadora que se inyecta de modo virtualmente instantáneo y que frecuentemente se conoce con el nombre de función delta o pulsación) se denomina curva C a la respuesta **normalizada** del trazador en la corriente de salida frente al tiempo, figura 2.5.

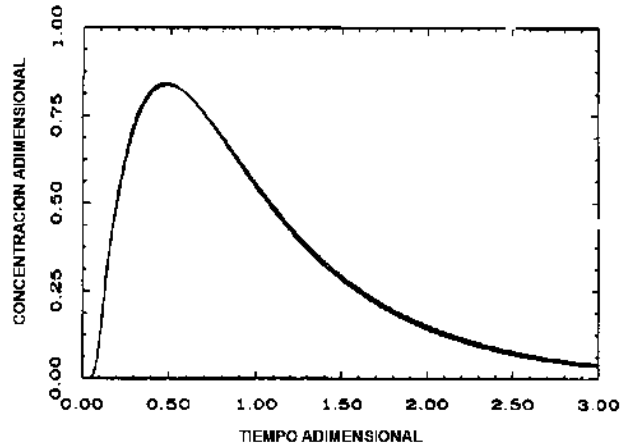


Figura 2.5 Curva C. [4]

2.4.2.2 Trazador.

La densidad del trazador debe ser la misma que la del fluido de trabajo, o en su defecto lo más cercana posible. Al utilizar trazadores con densidades mayores a las del fluido de trabajo se alteran los patrones de flujo de fluidos así como la forma de la curva de Distribución de tiempos de Residencia. Lo anterior provoca que se haga una mala caracterización del flujo de fluidos en el distribuidor. [12]

2.4.3 Caracterización del Flujo de Fluidos en el Distribuidor de Colada.

El comportamiento real de los distribuidores nunca se ajusta a las situaciones de flujos ideales (pistón y mezcla completa). Las desviaciones de la idealidad son originadas por canalizaciones en el flujo, recirculaciones o por la formación de zonas muertas. Estas desviaciones deben evitarse en la medida de lo posible ya que originan una disminución en la eficacia del proceso. [11]

La caracterización del flujo en los distribuidores de colada continua cuantifica estas desviaciones de la idealidad, por medio de la curva de distribución de tiempos de residencia. En este modelo, se considera que el volumen del fluido consiste de tres fracciones: una fracción de volumen pistón, volumen mezclado y por último la fracción de volumen muerto. [4, 5, 14]

- **Flujo Pistón o Tapón.** Tiene lugar cuando la velocidad del fluido es uniforme en toda la sección longitudinal del reactor. Cada elemento del fluido que entra al reactor pasa a través de él sin mezclarse con otros

elementos del fluido que entran antes o después, por lo que todos los elementos del fluido poseen el mismo tiempo de residencia. ^[13, 14]

- **Flujo mezclado o disperso.** El mezclado dentro del reactor es el máximo posible, por lo que las distintas propiedades del fluido son totalmente homogéneas en todas las secciones del reactor. ^[13, 14]
- **Flujo muerto.** Es el fluido que se mueve lentamente en el distribuidor y permanece más de dos tiempos medios de residencia. (Tiempo medio de residencia es la razón del volumen del líquido a la velocidad del flujo volumétrico). ^[15]

Es deseable tener mayor parte de volumen mezclado para incrementar el tiempo de residencia y lograr una adecuada remoción de inclusiones no metálicas (para cuando no se tiene cambio de grado frecuente), de lo contrario se prefiere el flujo pistón, ya que éste nos disminuye la zona de transición y disminuye el consumo de refractario. El volumen muerto debe reducirse al mínimo ya que éste no participa en los procesos de transferencia de calor y masa que ocurren dentro del distribuidor (debido al lento movimiento del flujo); además de que origina puntos calientes en donde puede haber mayor desgaste del refractario (cuando el distribuidor posee un mecanismo de calentamiento auxiliar), o bien, puntos fríos donde puede ocurrir una solidificación prematura. ^[15]

Para la cuantificación de estas fracciones de volumen se han propuesto diversos modelos de mezclado. Kemeny y colaboradores ^[5] propusieron las siguientes ecuaciones:

$$V_{dv} = 1 - \bar{\theta}_c \quad (2.10)$$

$$V_{pv} = \theta_{\min} = \theta_{\max} \quad (2.11)$$

$$V_{mv} = \frac{1}{C_{\max}} \quad (2.12)$$

$$V_{dv} + V_{pv} + V_{mv} = 1 \quad (2.13)$$

Ahuja y Sahai ^[5] cuestionaron la exactitud de este modelo por dos razones:

- La presencia de la difusión longitudinal o axial en el distribuidor provocan que el tiempo de la primera aparición del trazador ($\theta_{\min}$) y el tiempo al cual la concentración su máximo ($\theta_{\max}$) no sean iguales.
- La sumatoria de las fracciones de volumen no es igual a 1.

Para evitar estas contradicciones propusieron un modelo denominado “modelo mezclado modificado” el cual consiste de las siguientes ecuaciones:

$$V_{dv} = 1 - \bar{\theta}_c \quad (2.14)$$

$$V_{pv} = \frac{(\theta_{\min} + \theta_{\max})}{2} \quad (2.15)$$

$$V_{mv} = 1 - V_{dv} + V_{pv} \quad (2.16)$$

Sin embargo, los dos modelos anteriores son aplicables cuando el volumen muerto es considerado como estático. En el distribuidor el volumen muerto es una zona de movimiento muy lento más no estático. Considerando esta situación, Sahai y Emi ^[4, 5, 14] propusieron una expresión corregida para el cálculo de la fracción de volumen muerto:

$$V_{dv} = 1 - \frac{Q_a}{Q} * \bar{\theta}_c \quad (2.17)$$

El término (Q_a/Q) representa la fracción volumétrica del flujo a través de la región activa, numéricamente es igual al área bajo la curva C entre $\theta = 0$ y $\theta = 2$. Este último modelo es el utilizado en la presente investigación.

La caracterización del flujo de fluidos es muy importante ya que proporciona un panorama cualitativo en cuanto a la eficiencia en la remoción de inclusiones. Ahuja y Sahai postularon que para alcanzar la máxima separación de inclusiones en un distribuidor de colada continua es necesario asegurar ^[5, 9, 16]:

- Mínima distribución de tiempos de residencia.
- Mínimo volumen muerto.
- Tanto la relación de flujo pistón a volumen muerto así como la relación de flujo pistón a flujo mezclado sean grandes.
- Flujo dirigido a la superficie.

- Capa de escoria sin movimiento.
- Existencia de regiones de mezclado contenidas.

2.4.4 Modelación Matemática.

Un modelo matemático consiste de un conjunto de ecuaciones algebraicas o diferenciales, las cuales describen cuantitativamente el proceso o fenómeno a estudiar. La modelación matemática es una excelente opción para establecer relaciones entre las diversas variables de proceso, además que para nuevos procesos provee una guía para la planeación de experimentos físicos y concordancia del proceso con las leyes físicas y suposiciones realizadas. ^[17]

En cuanto a su aplicación en el distribuidor de colada, la modelación matemática provee una imagen más detallada de la distribución de velocidades, turbulencia y temperatura. Tanto la modelación matemática como la física deben considerarse como actividades complementarias para la validación de los resultados y teniendo en cuenta que cada una tiene sus ventajas y desventajas. ^[17]

2.4.4.1 Naturaleza del Flujo de Fluidos.

El flujo de fluidos tiene una función sumamente importante en las operaciones llevadas a cabo en el distribuidor, las leyes de la mecánica de fluidos gobiernan el flujo del metal, el movimiento y flotación de inclusiones, etc. Los regímenes de flujo son clasificados regularmente en laminar o turbulento. En el flujo laminar las capas o láminas de fluido se deslizan una sobre otra, sin un mezclado macroscópico, en dirección perpendicular al flujo de fluidos. Es decir se puede decir que el fluido laminar depende del movimiento individual de las moléculas. Para el flujo de un fluido de ciertas condiciones físicas, cuando se incrementa la velocidad del fluido en un conducto de geometría dada, existe una velocidad crítica arriba de la cual el flujo será turbulento. El flujo turbulento tiene lugar gracias al movimiento de grandes grupos o paquetes de moléculas llamados remolinos, por lo tanto en el flujo turbulento existe un mezclado macroscópico entre las láminas o porciones del fluido sobre distancias relativamente grandes.

El flujo de fluidos en el distribuidor de colada continua es sumamente complejo, ya que se tiene una región de alta turbulencia, localizada en la zona

de entrada y en las salidas, y el resto del distribuidor que corresponde a una zona de transición. En la zona de transición los efectos del flujo laminar y turbulentos son igualmente importantes, en cambio en las zonas turbulentas los efectos estrictamente laminares son despreciables.

Las ecuaciones que rigen el flujo de fluidos en el distribuidor de colada continua son:

- La ecuación de continuidad.
- Las ecuaciones de Navier-Stokes.
- Las ecuaciones del modelo de turbulencia.

2.4.4.2 Ecuación de Continuidad y de Navier-Stokes.

Los dos primeros grupos de ecuaciones mencionados anteriormente fueron desarrolladas primeramente para la condición de flujo laminar y a partir de ahí se extendieron para su aplicación a flujos turbulentos ^[18,-20]. La ecuación de continuidad es desarrollada a partir de la aplicación de la ley de conservación de masa a un pequeño elemento de volumen dentro de un flujo de fluido. La ecuación de continuidad en su forma más simple, para flujos laminares y densidad constante, es la siguiente:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.18)$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes se derivan de la aplicación de un balance de momento a un volumen de control.

$$\rho \frac{Dv_x}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (2.19)$$

$$\rho \frac{Dv_y}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (2.20)$$

$$\rho \frac{Dv_z}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (2.21)$$

Para un flujo turbulento completamente desarrollado la velocidad instantánea, v_x , es una función que oscila irregularmente sobre su valor

promedio en el tiempo, denominada velocidad de tiempo ajustado, $\bar{v}_x$. Por lo tanto la velocidad instantánea del fluido, v_x , puede expresarse como la suma de la velocidad de tiempo ajustado $\bar{v}_x$ y su componente fluctuante v'_x .

$$v_x = \bar{v}_x + v'_x \quad (2.22)$$

Para expresar las ecuaciones de continuidad y movimiento para un flujo turbulento se sustituye v_x por $\bar{v}_x + v'_x$, y P por $\bar{P} + P'$, obteniéndose [18]:

La ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{v}_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{v}_z) = 0 \quad (2.23)$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{D\bar{v}_x}{Dt} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu_t \nabla^2 \bar{v}_x + \rho g_x - \rho \frac{\partial}{\partial x}(\bar{v}_x'^2) - \rho \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}_x' \bar{v}_y') - \rho \frac{\partial}{\partial z}(\bar{v}_x' \bar{v}_z') \quad (2.24)$$

$$\rho \frac{D\bar{v}_y}{Dt} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu_t \nabla^2 \bar{v}_y + \rho g_y - \rho \frac{\partial}{\partial x}(\bar{v}_x' \bar{v}_y') - \rho \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}_y'^2) - \rho \frac{\partial}{\partial z}(\bar{v}_y' \bar{v}_z') \quad (2.25)$$

$$\rho \frac{D\bar{v}_z}{Dt} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu_t \nabla^2 \bar{v}_z + \rho g_z - \rho \frac{\partial}{\partial x}(\bar{v}_x' \bar{v}_z') - \rho \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}_y' \bar{v}_z') - \rho \frac{\partial}{\partial z}(\bar{v}_z'^2) \quad (2.26)$$

Los términos relacionados con los componentes fluctuantes de la velocidad, por ejemplo $\rho \bar{v}_x' \bar{v}_z'$, se denominan esfuerzos de Reynolds. Cuando los componentes fluctuantes en las tres direcciones son aproximadamente iguales o independientes de la dirección, la turbulencia es isotrópica. Por lo que las ecuaciones quedan de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{v}_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{v}_z) = 0 \quad (2.27)$$

$$\rho \frac{D\bar{v}_x}{Dt} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu_t \nabla^2 \bar{v}_x + \rho g_x \quad (2.28)$$

$$\rho \frac{D\bar{v}_y}{Dt} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu_t \nabla^2 \bar{v}_y + \rho g_y \quad (2.29)$$

$$\rho \frac{D\bar{v}_z}{Dt} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu_t \nabla^2 \bar{v}_z + \rho g_z \quad (2.30)$$

El término μ_t se conoce como viscosidad turbulenta, que se genera como resultado del movimiento de los remolinos sobre distancias relativamente grandes. Los valores de la viscosidad turbulenta suelen ser de 10^3 a 10^5 veces más grandes respecto a los de la viscosidad molecular.

2.4.4.3 Modelos de Turbulencia.

La turbulencia es un fenómeno natural que tiene lugar cuando existen altos gradientes de velocidad, resultando en variaciones en el dominio del flujo en función del espacio y del tiempo. Ya que estas fluctuaciones pueden ser muy pequeñas y frecuentes, el requerimiento computacional suele ser muy alto en los cálculos ingenieriles. Para evitar esto, las ecuaciones gobernantes exactas son manipuladas para reducir los efectos de los componentes fluctuantes, resultando un conjunto de ecuaciones menos demandantes de recursos computacionales. Los modelos de turbulencia son necesarios para el cálculo de los coeficientes de transporte turbulento, tal como la viscosidad turbulenta, la longitud de mezcla de Prandl (ℓ) y determinar la distribución de las velocidades. Los modelos de turbulencia se clasifican de acuerdo al número de ecuaciones diferenciales parciales que utilizan para calcular la viscosidad turbulenta indirectamente.

Modelos de cero ecuaciones.

Estos modelos consideran la turbulencia como un conjunto de capas, teniéndose expresiones algebraicas de (ℓ) y (μ_t) independientes para cada región. Ejemplo de este tipo de modelos es el modelo Cebesi-Smith^[21] y el modelo Baldwin Lomax.^[21]

Modelos de una ecuación.

En esta clase de modelos la viscosidad turbulenta se representa por medio de la siguiente expresión:

$$\mu_t = c_\mu k^{1/2} \ell \quad (2.31)$$

Donde k representa el transporte de energía turbulenta y se obtiene de una ecuación diferencial parcial y ℓ a partir de una ecuación algebraica. Ejemplo de este tipo de modelos es el modelo de Spalart y Allmaras.^[21]

Modelos de dos ecuaciones:

El planteamiento de la viscosidad turbulenta en este tipo de modelos es:

$$\mu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.32)$$

Donde k representa el transporte de energía turbulenta y ε su velocidad de disipación. En este tipo de modelos se considera a la turbulencia como isotrópica. Existen varios modelos de este tipo entre los cuales destacan el *modelo $k-\varepsilon$* y el *$k-\omega$* .

De los modelos anteriores, el de dos ecuaciones es el más usado debido a que los resultados obtenidos han mostrado una mayor confiabilidad. Debido a que no existe un modelo de turbulencia de aplicación general para todo tipo de problemas, la elección del modelo de turbulencia dependerá de ciertas consideraciones tales como el tipo de problema, la clase de fluido, la precisión deseada, los recursos computacionales disponibles y la cantidad de tiempo disponible para la simulación.

En Fluent® versión 6.2.16 se pueden seleccionar varios tipos de modelos de turbulencia^[22]:

- **Modelo Spalart-Allmaras.** Es un modelo de una sola ecuación. Es ampliamente usada en aplicaciones aeroespaciales, en turbomáquinas. Al tratarse de un modelo de una ecuación es muy criticado ante su incapacidad para adaptarse a cambios abruptos del flujo.

- Modelo $k-\varepsilon$. Es un modelo de dos ecuaciones muy ampliamente utilizado en la simulación de flujo de fluidos y transferencia de calor. Tiene tres variantes las cuales son el modelo estándar, de renormalización y el realizable.
- Modelo $k-\omega$. En este modelo se incorporan modificaciones para tomar en cuenta los efectos de bajos números de Reynolds, de compresibilidad y entre otras. Este modelo es aplicado en flujos con gradientes de presión adversos, en flujos aerodinámicos y aplicaciones espaciales.
- Modelo de los esfuerzos de Reynolds (RSM). Es el modelo de turbulencia más elaborado que se puede utilizar en Fluent®. Este modelo resuelve las ecuaciones de transporte y los esfuerzos de Reynolds junto con una ecuación para la velocidad de disipación. Esto significa que para flujos tridimensionales se tienen que resolver siete ecuaciones de transporte. Este modelo presume de tener una mayor precisión en la simulación de flujos que involucran remolinos, recirculaciones y cambios abruptos aunque el requerimiento computacional es mucho mayor que para los otros modelos. Dentro de sus aplicaciones prácticas es utilizado para modelar flujos centrífugos, flujos altamente rotatorios en cámaras de combustión y flujos con altas velocidades en ductos.

En términos del requerimiento computacional el modelo Spalart-Allmaras es el menos demandante ya que se trata de un modelo de una sola ecuación. Los modelos de dos ecuaciones, debido a esta situación, requieren mayor esfuerzo computacional. El modelo estándar $k-\varepsilon$ es el menos demandante. El modelo realizable requiere un esfuerzo computacional ligeramente mayor al estándar, sin embargo el modelo de re-normalización es el más demandante ya que tiende a tomar 10-15% más tiempo computacional respecto al modelo estándar. El modelo $k-\omega$ requiere prácticamente el mismo gasto computacional.

Comparado con los modelos de dos ecuaciones, el modelo RSM requiere más tiempo CPU y memoria adicional debido a que es un modelo más

robusto. El modelo RSM requiere aproximadamente 50-60% más tiempo CPU por iteración que el modelo $k - \varepsilon$.

Algunas investigaciones han sido enfocadas en la comparación de diferentes modelos de turbulencia^[23-25]. Por ejemplo, Koría^[23] y colaboradores compararon el modelo $k - \varepsilon$ estándar con el RSM en el cálculo de la Distribución de Tiempos de Residencia, encontraron que el tiempo en el que se presenta la concentración máxima prácticamente es el mismo para ambos modelos, aunque la cantidad de iteraciones que efectúa el modelo RSM para encontrar este valor es mucho mayor respecto al modelo $k - \varepsilon$. Por lo que concluyeron que desde el punto de vista óptimo respecto a la precisión y consumo de tiempo computacional, el modelo $k - \varepsilon$ es el más indicado para ser aplicado en la modelación matemática de flujo de fluidos en estado estable en el distribuidor de colada continua y por lo tanto la suposición de que la turbulencia se comporta isotrópicamente es aceptada.

El modelo empleado en esta investigación es el modelo $k - \varepsilon$ estándar el cual se describe a continuación.

2.4.4.3.a Modelo k-ε estándar.

El modelo $k - \varepsilon$ estándar es el caballo de batalla de los ingenieros en el modelado de diversos problemas de simulación de flujo de fluidos y transferencia de calor debido a su simplicidad, economía y su razonable precisión. Este es un modelo semiempírico y la derivación de las ecuaciones recaen en consideraciones fenómeno-lógicas y empiricismos. En este modelo de turbulencia se considera un flujo completamente desarrollado y los efectos de la viscosidad molecular se desprecian, además de que la turbulencia se considera isotrópica.^[22]

Las ecuaciones para el cálculo de la energía cinética turbulenta, k , y su tasa de disipación, ε , son las siguientes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_K \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.34)$$

En estas ecuaciones G_K representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad promedio, G_b la generación de energía cinética turbulenta debido a las fuerzas boyantes (caso anisotérmico), Y_M representa la contribución debido a las fluctuaciones por dilatación en la compresibilidad turbulenta (despreciable en el modelado de fluidos incompresibles). $C_{1\varepsilon}$ y $C_{2\varepsilon}$ son constantes cuyos valores son 1.44 y 1.92 respectivamente σ_k y σ_ε son los números de Prandtl turbulentos para k y ε , cuyos valores son 1.0 y 1.3 respectivamente. Por último S_K y S_ε son términos fuente definidos por el usuario. La viscosidad turbulenta está definida por la ecuación (2.30) y el valor de la constante c_μ es 0.09. Los valores de las constantes involucradas en el modelo fueron determinados experimentalmente y han demostrado trabajar bastante bien para un amplio rango de flujos.

La ecuación para determinar la generación cinética turbulenta, G_k es la siguiente:

$$G_k = \mu_t \left(\sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \right) \quad (2.35)$$

$$S_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.36)$$

Donde S es el módulo de la velocidad promedio de deformación del remolino.

2.4.4.4 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

La dinámica de fluidos computacional es una herramienta de ingeniería que permite simular de forma detallada cualquier sistema o equipo en el cual intervenga flujo de fluidos o fenómenos de transferencia de calor o masa.

Se basa en la resolución numérica de las ecuaciones fundamentales de conservación de materia, energía y cantidad de movimiento en un dominio (geometría) concreto discretizado, es decir, convertido en una malla de puntos (volúmenes o elementos finitos). Como resultado, se obtienen los valores de todas las variables características del sistema (presión, velocidad, temperatura, composición, etc.) en cada punto de la malla de cálculo y en función del tiempo en procesos transitorios. Las etapas de cálculo en CFD son las siguientes:

1. Identificación del problema y pre procesamiento
 - ♦ Dibujo de la geometría concreta a simular,
 - ♦ Generación de la malla.
 - ♦ Definición de los aspectos físicos del problema (componentes presentes y fenómenos a estudiar.)
 - ♦ Definición de las condiciones iniciales y de frontera.
2. Solución numérica del problema.
 - ♦ Definición de los parámetros de cálculo numérico.
 - ♦ Seleccionar el método de solución.
3. Postproceso.
 - ♦ Análisis de resultados y generación de gráficos, imágenes o videos de los mismos.

2.4.4.4.a Generación de la Malla.

Las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos son ecuaciones diferenciales parciales. A causa de los términos no lineales en estas ecuaciones diferenciales parciales, los métodos analíticos dan muy pocos resultados, recurriéndose a los métodos numéricos para obtener las soluciones del problema en cuestión. De los métodos numéricos desarrollados que se ocupan de las ecuaciones que rigen los problemas de flujo de fluidos los más utilizados son: los métodos de diferencia finita y los métodos de volumen finito. Este último posee la ventaja de adaptarse a cualquier tipo de mallado por lo cual es el método utilizado por el software comercial Fluent®. [26]

La solución numérica de ecuaciones diferenciales parciales requiere que el dominio espacial continuo sea sustituido por uno discreto compuesto por puntos en una retícula o celdas. Además las ecuaciones diferenciales parciales que rigen el problema deben ser reemplazadas por un conjunto de ecuaciones algebraicas con las celdas de la retícula como su dominio. En una situación ideal estas ecuaciones algebraicas deben de representar el mismo ámbito físico que las ecuaciones diferenciales parciales.

Los sistemas reticulares o de mallas se clasifican como estructurados, no estructurados e híbridos. Las retículas estructuradas están formadas por líneas que forman un sistema de coordenadas curvilíneas. Por consiguiente las

celdas son rectangulares en 2D y hexaédricas en 3D. Las retículas no estructuradas se componen de líneas que no forman un sistema de coordenadas curvilíneas. Sus celdas pueden ser triangulares o tetraédricas o una combinación de varias formas. Las retículas híbridas implican una combinación de retículas estructuradas y no estructuradas. En la figura 2.6 se puede apreciar los diferentes tipos de celdas que se pueden utilizar para efectuar el mallado del sistema.

Una de las principales ventajas de las mallas no estructuradas es su implementación en geometrías complejas donde la aplicación de mallas estructuradas puede consumir mucho tiempo. Sin embargo, una de sus desventajas es que dada su forma puede afectar la convergencia. [27]

La generación numérica de mallas juega un papel fundamental en cualquier problema computacional científico en el cual la geometría de una región sea compleja o cuando la solución tiene una estructura muy complicada. Así pues, la investigación acerca de la generación de mallas está principalmente dirigida hacia la elaboración de algoritmos que las generen de manera automática. El término *automático* se refiere a que el esfuerzo necesario por parte del usuario para generar una malla sea reducido al mínimo: que sea la computadora la que realice la mayor parte del trabajo. [28]

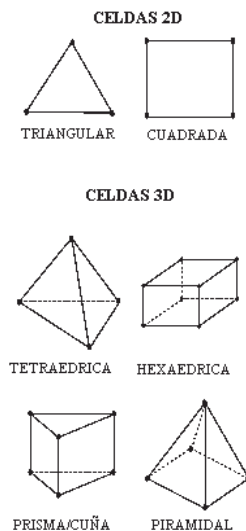


Figura. 2.6 Tipos de celdas. [22]

2.4.4.4 b Metodología de Solución.

La metodología de solución de las ecuaciones gobernantes se efectúa por medio de un método denominado Método de Solución por Segregación. El procedimiento de solución de este método se desarrolla por medio de la técnica de volumen finito, la cual consiste de los siguientes pasos:

- 1) División del dominio en una cantidad definida de volúmenes de control a través de un mallado computacional.
- 2) Integración de las ecuaciones gobernantes en cada volumen de control para construir ecuaciones algebraicas para las variables dependientes desconocidas tales como velocidades, presiones y temperaturas.
- 3) Discretizar las ecuaciones gobernantes para cada volumen control.
- 4) Linearización de las ecuaciones discretizadas y solución del sistema de ecuaciones lineales resultante para determinar los valores de las variables dependientes.

En este método las ecuaciones gobernantes son resueltas secuencialmente a través de un número determinado de iteraciones del ciclo de solución hasta lograr la convergencia. Cada iteración consta de los pasos ilustrados en la figura 2.7 y descritos a continuación. ^[22]

- I. Reajuste o actualización de las propiedades del fluido basándose en la solución vigente. Al tratarse de la primera iteración las propiedades del fluido corresponden a los valores establecidos inicialmente.
- II. Solución de las ecuaciones de momento aplicando los valores actualizados para la presión y flujos máscos, y de esta forma calcular y actualizar el campo de velocidades.
- III. Solución de la ecuación para la corrección de la presión, para obtener los valores corregidos para la presión, velocidades y flujos máscos que satisfagan la ecuación de continuidad. Este paso se origina en el hecho de que los valores obtenidos en el paso anterior (II) pueden no satisfacer la ecuación de continuidad local.

- IV. Solución de las ecuaciones para los escalares tales como turbulencia, energía, especies y radiación, aplicando los valores actualizados de las variables.
- V. Comprobación de la convergencia. Estos pasos se repiten hasta que se alcanza la convergencia.

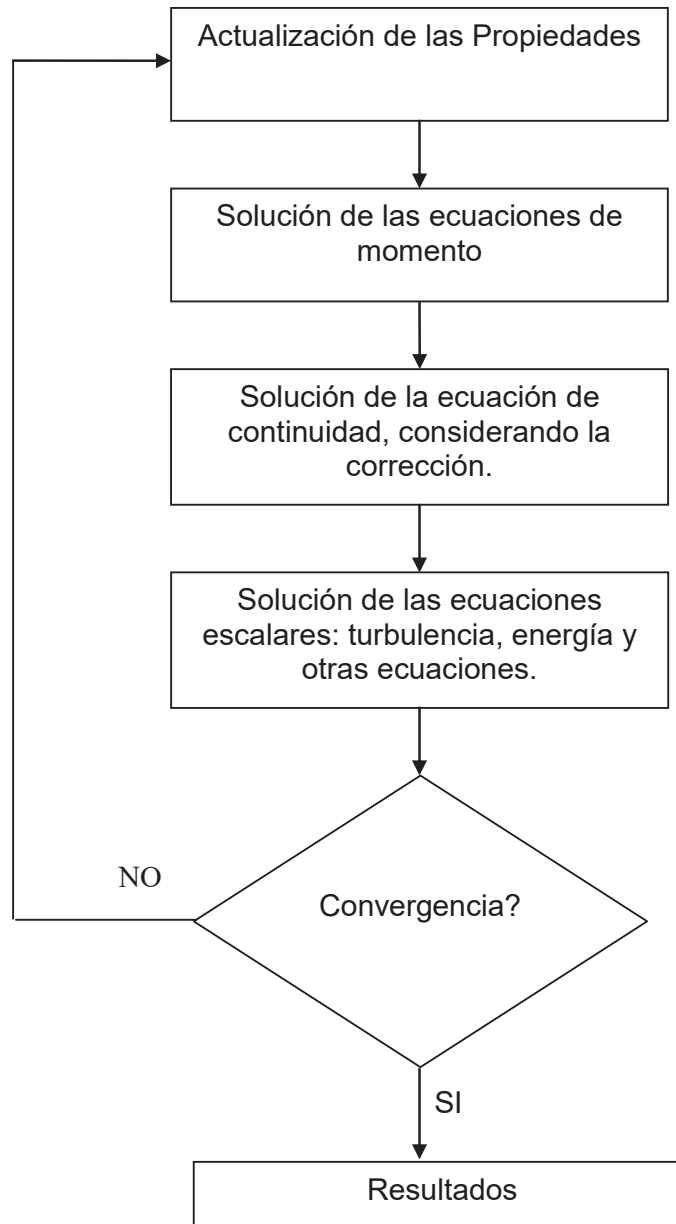


Figura 2.7 Algoritmo de solución a un problema CFD. ^[22]

2.5 Efecto de la Curvatura en las Paredes del Distribuidor.

El efecto de la curvatura sobre las paredes del distribuidor solo ha sido reportado en la literatura por Tripathi y Ajmani^[16], quienes estudiaron este efecto sobre un distribuidor tipo Delta, figura 2.8. La configuración de la pared curvada se puede observar en la figura 2.9.

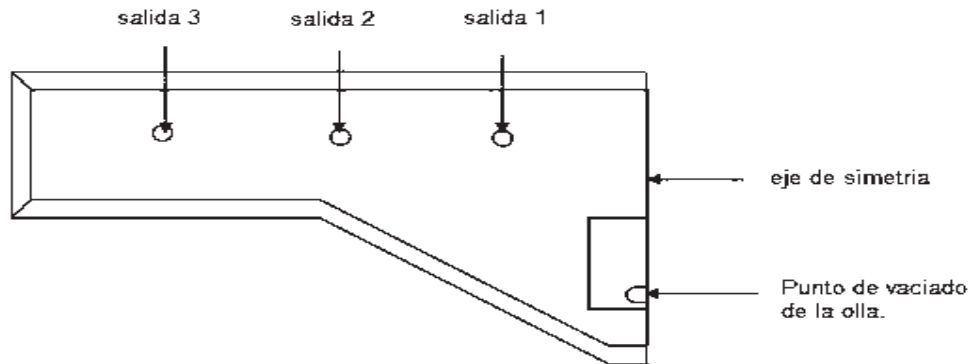


Figura. 2.8 Vista superior del distribuidor Delta.

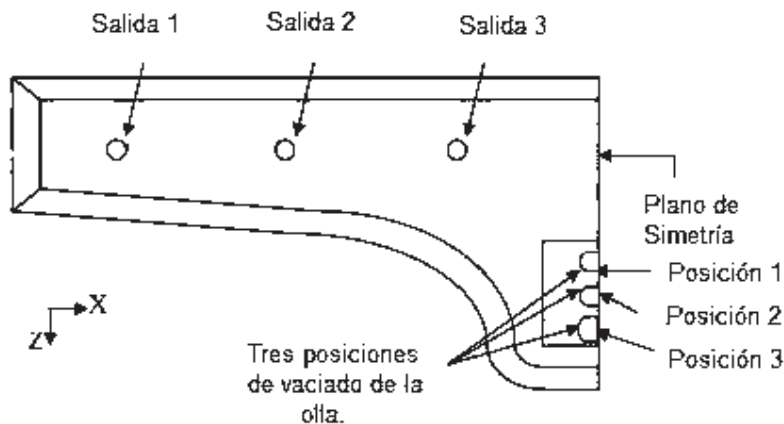


Figura. 2.9 Vista superior del distribuidor Delta curvado.

Concluyeron que el efecto provocado por la curvatura hace que el flujo sea más lento reduciéndose la turbulencia cerca de la entrada. Esto se explica por el incremento del área de contacto del líquido con la pared del distribuidor. Es decir la trayectoria del flujo se incrementa perdiéndose momento y por lo tanto aumentando el flujo pistón. También se logró reducir las zonas muertas y aumentar el tiempo de residencia en forma significativa como lo muestra la tabla 2.II:

Tabla 2.II. Comparación de volúmenes entre distribuidores delta y curvo.

No.	<i>RTD</i>	Forma Delta	Forma Curva
1	Tiempo de residencia (sec)	476	529
2	V_{pv}	0.02	0.29
3	V_{mv}	0.57	0.52
4	V_{dv}	0.41	0.19

2.6 Resumen.

El distribuidor es un equipo muy importante en el proceso de colada continua, debido a que es la última etapa donde el acero puede ser refinado y homogeneizado antes de ser solidificado. Debido a esto diversas investigaciones se han llevado a cabo alrededor del mundo buscando optimizar el diseño del distribuidor, modificando su geometría y su configuración interna.

Las altas temperaturas del proceso de colada continua y la opacidad del acero provocan que la experimentación tanto en la industria o como en planto piloto resulten poco factibles, por lo que se hace uso de técnicas experimentales como la simulación matemática y física para el estudio fluidinámico del distribuidor.

La simulación matemática trata de la solución numérica de las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos por medio de la discretización del sistema utilizando volúmenes de control, con la finalidad de determinar el comportamiento detallado del movimiento del fluido a través del distribuidor. Por su parte la simulación física hace uso de modelos deacrílico a escala y agua como fluido de trabajo, con el objetivo de visualizar el flujo de fluidos y validar los resultados de la simulación matemática.

La eficiencia del distribuidor propuesto es evaluada por medio de la caracterización del flujo de fluidos, la cual parte del análisis de las curvas de distribución de tiempos de residencia del fluido, e involucra la determinación de las fracciones de flujo mezclado, pistón y muerto, siendo este último el parámetro más crítico en la evaluación del comportamiento del distribuidor.

La forma geométrica del distribuidor propuesto, la cual no había sido estudiada hasta la fecha, puede ayudar a obtener un acero más limpio, haciendo la zona de entrada más estable sin utilizar inhibidor de turbulencia y disminuyendo las zonas muertas.

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción.

El distribuidor propuesto se puede definir como un distribuidor cilíndrico con casquetes semiesféricos en los extremos, tomando como base al distribuidor tipo recto para efectuar las modificaciones, figuras 3.1 y 3.2. En la primera etapa de la experimentación se hizo un comparativo del concepto geométrico del distribuidor propuesto y el tipo recto en dibujo, para lo cual se usó el software Autocad®. En las figuras 3.3 (a) y (b) se puede apreciar la comparación entre el distribuidor tipo recto y el propuesto.

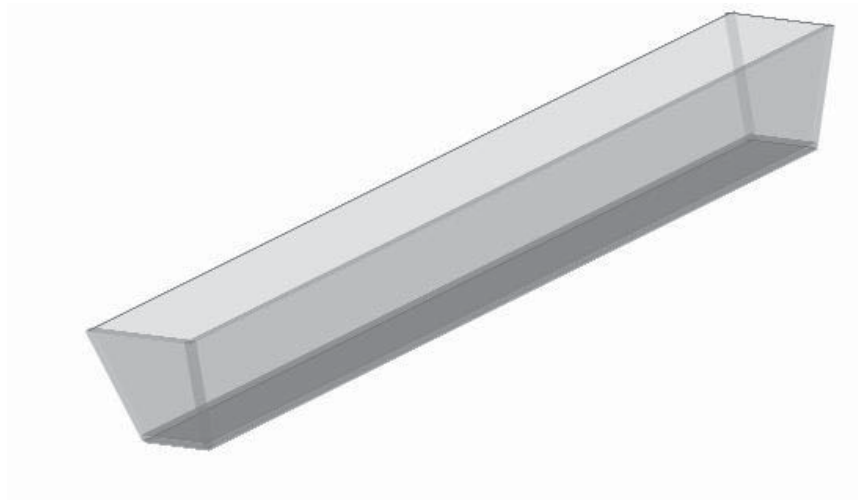


Figura 3.1 Distribuidor tipo recto.

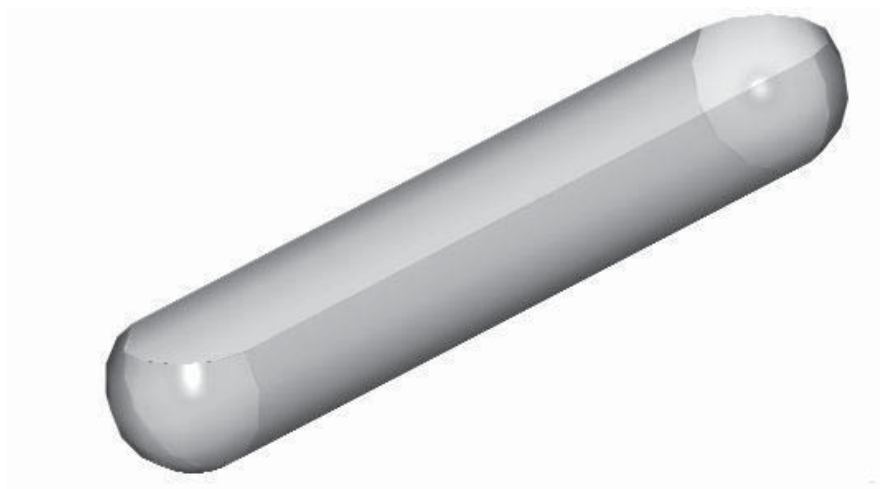
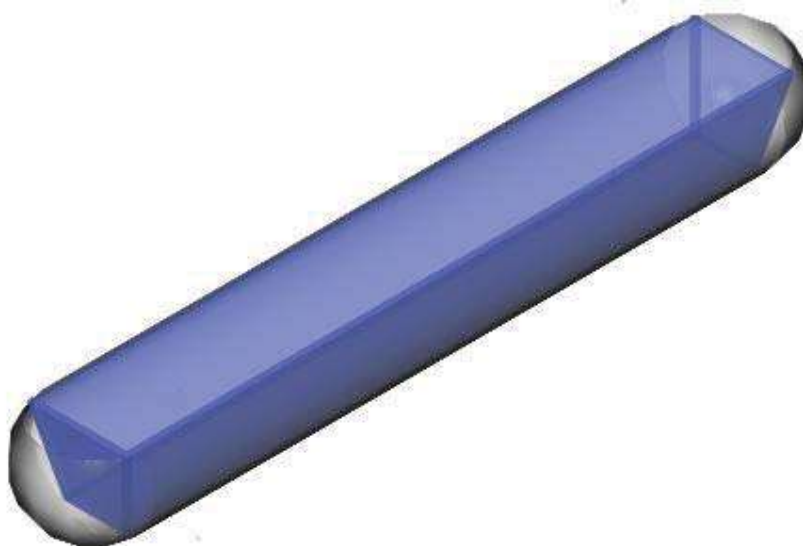


Figura 3.2 Distribuidor cilíndrico propuesto.



(a)



(b)

Figura 3.3 Comparación de los distribuidores (a) vistas isométrica y (b) lateral.

Al comparar los dos tipos de distribuidores resulta evidente el aumento en la capacidad en el distribuidor propuesto, ya que el distribuidor tipo recto tiene una capacidad de 40 toneladas, en cambio la capacidad del distribuidor propuesto es de 60 toneladas aproximadamente. Ahora bien este aumento en la capacidad del distribuidor y sobre todo la nueva forma tendrá efectos sobre la operación del mismo y sobre la fluidinámica del distribuidor por lo que se hace necesario investigar como se darán dichos cambios. Es obvio que en la planta industrial tratar de experimentar con este nuevo diseño de distribuidor sería prácticamente imposible por lo que se recurrirá a dos técnicas muy utilizadas en este tipo de problemas: la simulación matemática y la simulación física.

La etapa experimental está dividida en dos partes esenciales: la modelación matemática y la modelación física. El objetivo de efectuar estos dos tipos de modelación es primero para visualizar el comportamiento del flujo así como estudiar la fluidinámica del acero líquido en el nuevo diseño y segundo darse una idea de cómo sería el proceso; sobreenfriamiento, flotación de inclusiones, inserción de dispositivos en el distribuidor, etc. en un distribuidor real. Siempre se recomienda que se lleve primero a cabo la modelación matemática ya que ésta nos ahorra horas de modelado físico y los parámetros obtenidos de esta fase se validan en el modelado físico, es decir, en el modelo a escala del distribuidor propuesto. Esta técnica experimental ahorra tiempo, dinero y esfuerzo. El esquema general de experimentación se puede observar en la figura 3.4:

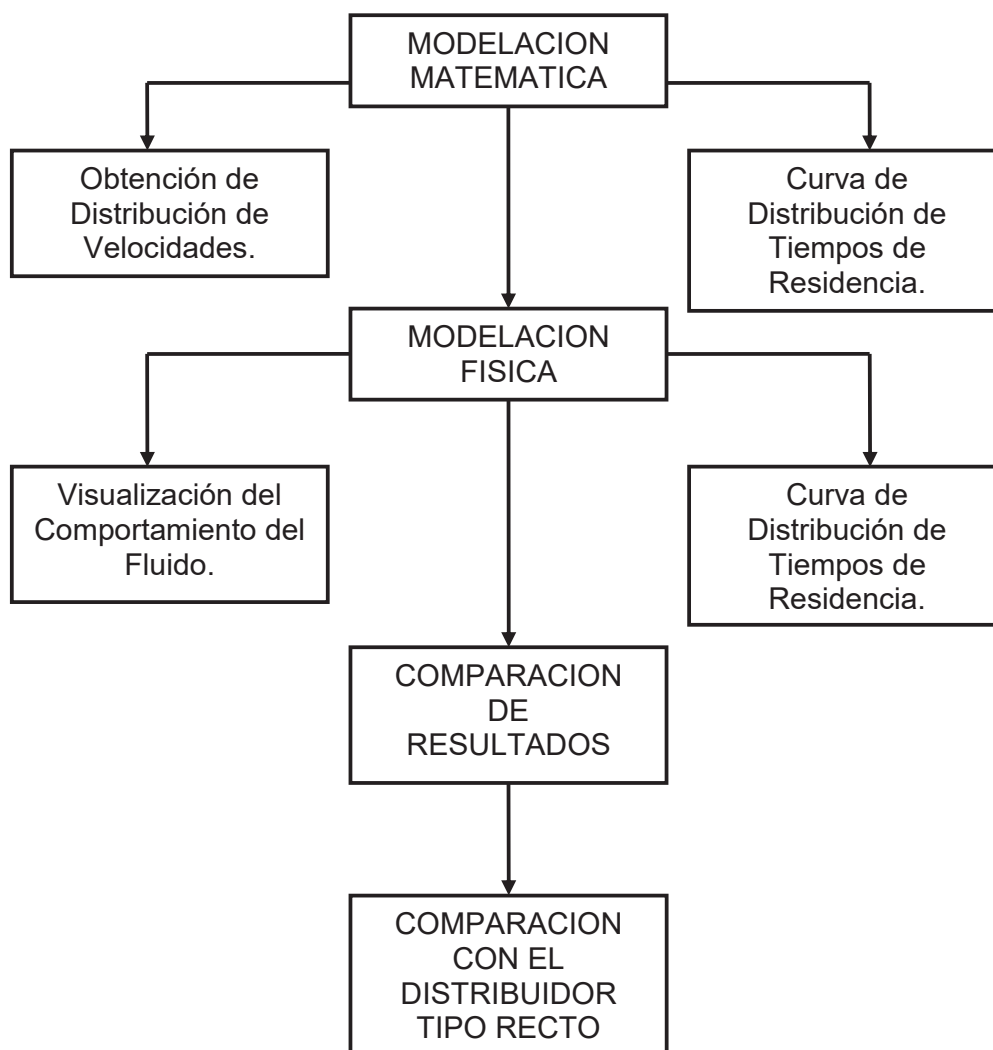


Figura 3.4 Esquema general de experimentación.

3.2 Modelación Matemática.

La modelación matemática es la parte de la experimentación desarrollada mediante software y hardware cuyo objetivo es resolver numéricamente las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos para obtener el comportamiento fluidinámico del sistema. El software utilizado fue el preprocesador Gambit® (Geometric and Mesh Building Interactive Tool) versión 2.2.30 y el procesador Fluent® versión 6.2.16. Las principales etapas de la modelación matemática se muestran en la figura 3.5.

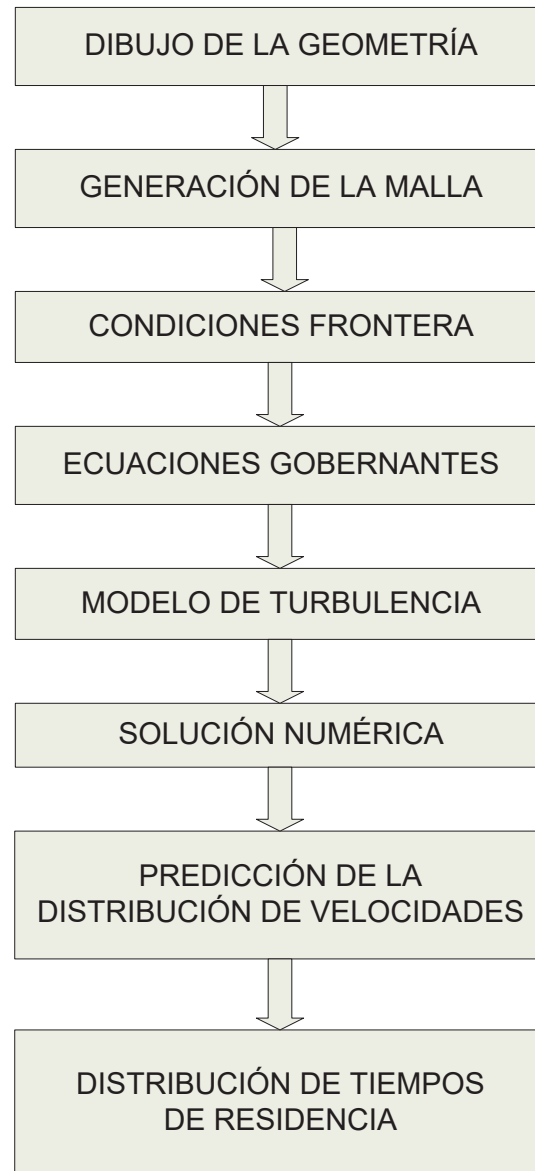


Figura 3.5. Etapas de la Modelación Matemática.

3.2.1 Dibujo de la Geometría.

En esta etapa se hace el diseño, es decir, se dibuja la geometría del distribuidor propuesto en el preprocesador Gambit® para posteriormente generar el mallado del sistema. Es importante mencionar que es necesario dibujar completamente la geometría en este programa, Gambit®, ya que la importación del dibujo hacia este programa desde cualquier otro paquete para diseño, como por ejemplo Autocad, no es posible. La geometría del sistema no solo implica dibujar el distribuidor sino también la buza de entrada y las salidas,

además de los cortes geométricos. Los cortes se refieren al fraccionamiento de la geometría del sistema teniendo como objetivos el separar dos objetos cuyos volúmenes se empalman, como es el caso del distribuidor y la buza de entrada, además del hecho de que con esto se puede tener una malla menos distorsionada. En las figuras 3.6 y 3.7 se puede apreciar el distribuidor con los cortes geométricos implementados así como el dibujo del distribuidor en el ambiente del preprocesador Gambit® respectivamente.

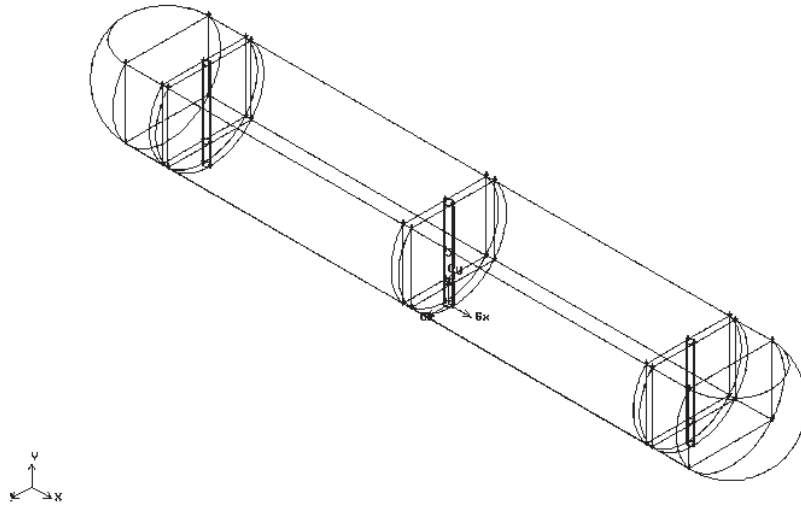


Figura 3.6 Vista isométrica del distribuidor y sus cortes.

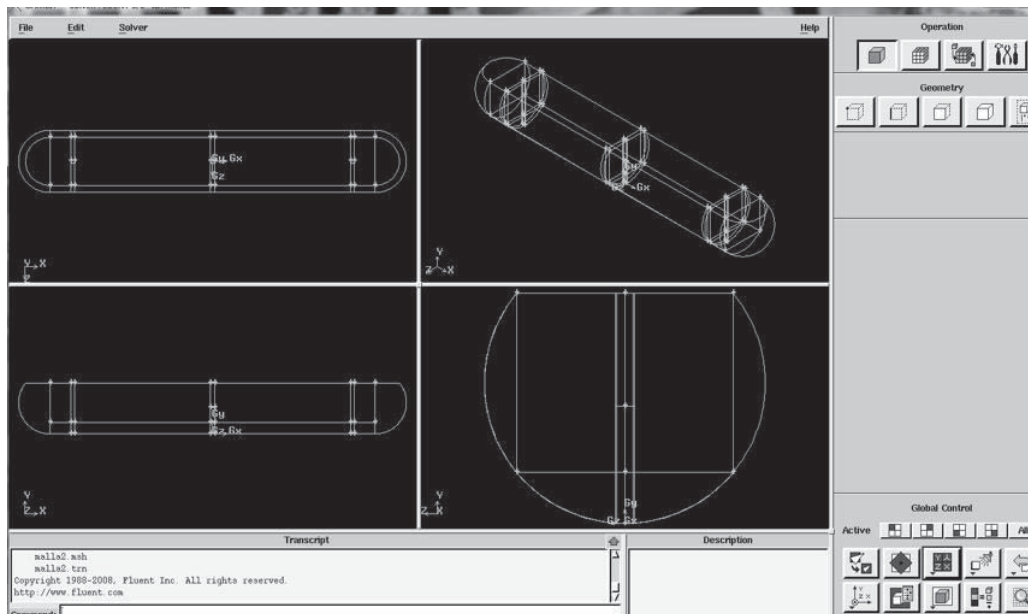


Figura 3.7 Ambiente de Gambit®.

3.2.2 Generación de la Malla.

Como ya se mencionó en el capítulo dos, el mallado es la discretización del sistema, en este caso utilizando volúmenes de control. En este sistema se utiliza un mallado híbrido, es decir la combinación del mallado estructurado y no estructurado. Este último solo se utiliza en los extremos semiesféricos del distribuidor propuesto debido a la complejidad de la geometría y a que la implementación de cortes en esta zona no es factible. El software Gambit® efectúa el mallado de forma automática, es decir el usuario selecciona primero la zona geométrica que desea malla, comenzando el mallado por las líneas que la conforman, donde el usuario especifica el número de nodos deseados, posteriormente se malla una de las caras que forman la zona y por último se malla el volumen de la zona especificada. En las dos últimas etapas, que son el mallado de la cara y del volumen, es donde el paquete asigna el tipo de malla, estructurada o no estructurada, que se debe utilizar de acuerdo a la forma geométrica que tiene el sistema. En la figura 3.8 se muestra un esquema del sistema mallado en su totalidad y en la figura 3.9 se puede observar la zona del mallado no estructurado presente en el sistema sobre un plano longitudinal del distribuidor.

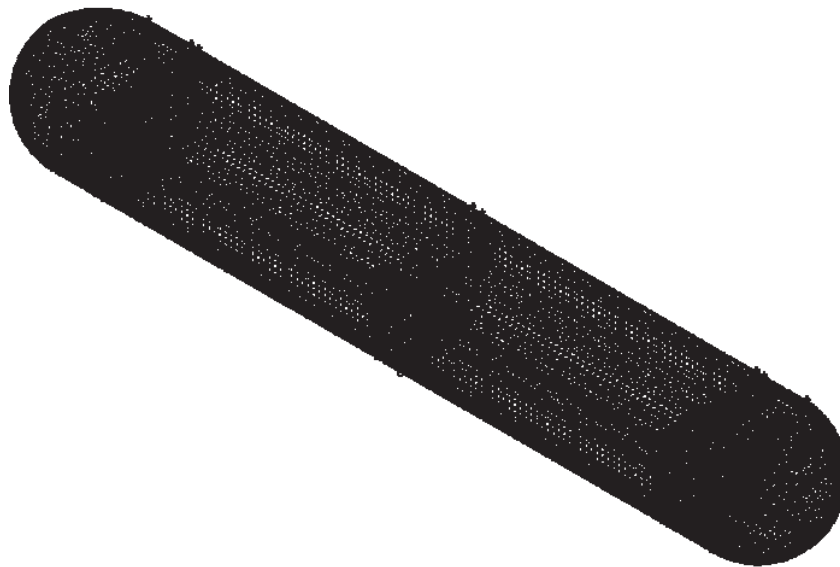


Figura 3.8 Mallado computacional híbrido (vista isométrica).

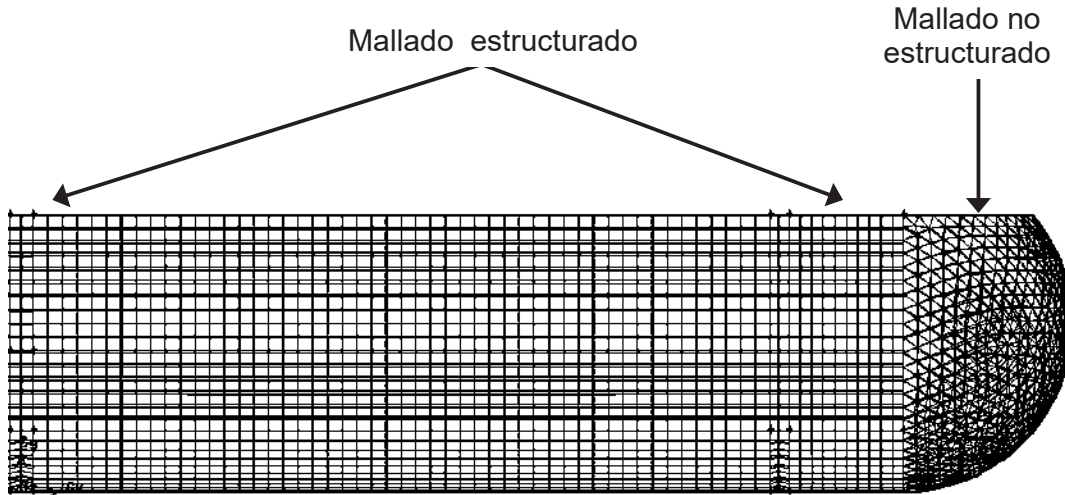


Figura 3.9. Mallado híbrido (vista frontal plano longitudinal central.)

3.2.3 Condiciones de Borde y Consideraciones.

Las condiciones de borde especifican los valores de las variables en los límites del modelo físico. Las ecuaciones gobernantes son similares para muchos de los problemas de flujo de fluidos, por lo que las condiciones frontera son las que definen el problema y lo diferencia de los demás. A su vez las consideraciones son importantes ya que ayudan a simplificar el modelo.

Las condiciones de borde y suposiciones aplicadas fueron las siguientes:

- No deslizamiento del flujo en todas las superficies sólidas. Esta condición especifica que la velocidad del fluido en contacto con una superficie sólida es la misma que la de las superficies. Para un contenedor estacionario, esto significa que la velocidad será igual a cero en las superficies estacionarias, como es el caso del distribuidor.
- La entrada en el flujo de fluido en el distribuidor se definió como “entrada de velocidad”, es decir en unidades de m/seg. Esto debido a que si se hubiera seleccionado una entrada de flujo másico se requiere una malla excesivamente fina en el plano de entrada para que tome el valor de velocidad adecuado. La velocidad de entrada se calculó a partir del criterio de similitud de Froude, y es igual a 0.55 m/seg.

- Condición frontera de simetría (40 toneladas). Esta condición es de mucha utilidad para reducir el requerimiento computacional y básicamente implica un flujo nulo en eje de simetría. Esto permite estudiar el modelo en una fracción del modelo, es decir, en un cuarto del modelo por ejemplo.
- El fluido dentro del distribuidor se comporta como un fluido Newtoniano.
- El fluido es incompresible, lo cual significa que la densidad del fluido no cambia respecto al tiempo, presión o temperatura. Esta suposición no es real para el acero líquido pero es necesaria para el modelado matemático ya que la densidad dentro de cada elemento de fluido permanece constante.
- Flujo completamente turbulento.
- Estado isotérmico. Esta consideración implica que no existen cambios de temperatura y que por ende las propiedades del fluido se consideraron constantes.
- El fluido utilizado para todos los casos simulados matemáticamente fue agua. Esto debido a que el agua y el acero líquido presentan una viscosidad cinemática muy cercana.
- Las fuerzas gravitacionales actúan solamente sobre el eje y.
- No se consideró la presencia de escoria y la superficie libre del líquido fue considerada como plana.

A través del software Gambit® se definieron las condiciones límite generales, las cuales establecen que secciones corresponden a las paredes del distribuidor, la entrada y las salidas. Una vez creada la geometría, el mallado y las condiciones frontera, se guarda el documento, llamado “caso” en la simulación matemática, y se exporta como archivo *.msh* para poder ser leído por Fluent®.

3.2.4 Condiciones de la Simulación.

Posteriormente, ya en el código Fluent® se importa la malla, se definen los fluidos de trabajo, en este caso solo agua, y se proporcionan los valores de la velocidad de entrada del fluido al sistema.

Además se seleccionan las ecuaciones gobernantes así como el modelo de turbulencia adecuado, siendo para este trabajo la ecuación de continuidad, las ecuaciones de Navier-Stokes, ambos grupos para flujos turbulentos, y el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ estándar. Los valores iniciales para los parámetros $k-\varepsilon$ se obtuvieron a partir de las siguientes fórmulas: ^[16]

$$k = 0.0384 * \frac{(V_{in}^2)}{Re^{1/4}} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = 2.3473 \frac{(k^{3/2})}{D_{in}} \quad (3.2)$$

Los valores numéricos de estos parámetros son:

$$V_{in} = 0.55 \text{m/seg.}$$

$$D_{in} = 15.5 \text{mm.}$$

$$\kappa = 1.195 * 10^{-3}$$

$$\varepsilon = 6.2564 * 10^{-3}$$

Los valores iniciales de los parámetros de turbulencia son importantes para facilitar la convergencia en la solución numérica de las ecuaciones gobernantes.

3.2.5 Solución Numérica.

La solución numérica de las ecuaciones se lleva a cabo con el programa Fluent® utilizando el método de segregación. El algoritmo de acoplamiento entre la presión y la velocidad es el denominado SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation). Los criterios de convergencia seleccionados para los residuales fueron de 10^{-3} . Los factores de relajación para los parámetros de presión, velocidad y turbulencia fueron de 0.3, 0.7 y 0.8 respectivamente. La solución numérica se efectuó en una computadora personal de las siguientes características:

- ♦ Modelo HP Pavilion dv9000.
- ♦ Procesador AMD Turion 64*2 Mobile Technology TL-64 2.2GHz.
- ♦ Memoria Ram: 2 GB.

3.2.6 Simulación Matemática del Tiempo de Residencia.

Después de obtener la distribución de velocidades en estado estable, la siguiente etapa es la simulación de la distribución de tiempos de residencia. Dicha simulación se realiza en estado inestable siendo la ecuación de la concentración la siguiente: ^[9]

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{v}_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{S_{ct}} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \quad (3.3)$$

La inyección del trazador se simula dando un tiempo de paso de 1 segundo y posteriormente se simula su difusión a través del distribuidor. El criterio de convergencia para la ecuación anterior es de 10^{-5} . El monitoreo de estos datos se logra colocando virtualmente una estación de muestreo en el centro de cada una de las salidas. La propiedad monitoreada es la concentración molar del trazador. Los datos de la concentración molar respecto al tiempo son almacenados en archivos .txt, uno por cada una de las salidas monitoreadas.

3.3 Simulación Física.

La simulación física, utilizando un modelo en acrílico a escala de un sexto de uso industrial y teniendo como fluido de trabajo agua, permite la validación del modelo matemático por medio de la visualización del flujo de fluidos además de obtener las curvas de distribución de tiempos de residencia. Las principales etapas de la simulación física se observan en la figura 3.10.

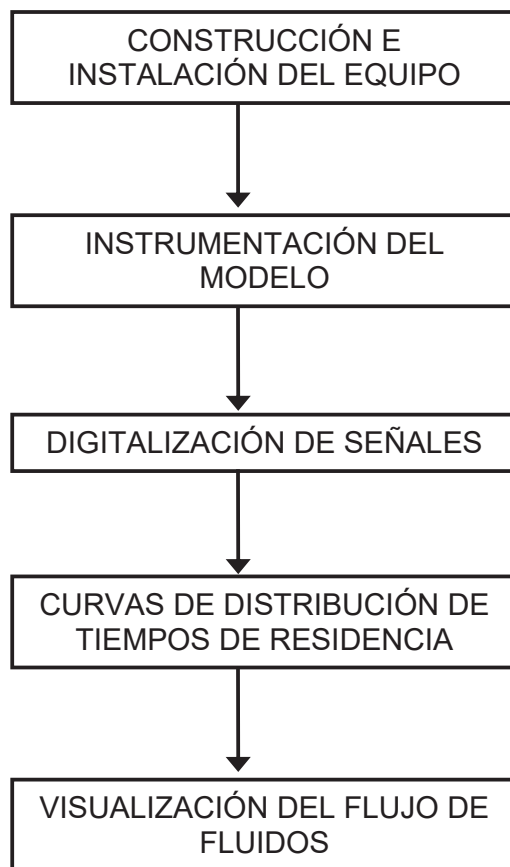


Figura 3.10 Etapas de la simulación física.

3.3.1 Construcción e Instalación del Equipo.

El distribuidor a escala se construyó en acrílico de 0.9 cm. de espesor sin ningún dispositivo modificador de flujo. Cabe señalar que es una operación muy complicada y de especial dificultad la construcción de los casquetes semiesféricos del distribuidor. La buza de alimentación así como las dos buzas de descarga fueron construidas a partir de un cilindro de un polímero duro mejor conocido como Nylamid al que se le hizo un orificio de un diámetro interno de 1.5 cm. El flujo del agua fue regulado tanto por válvulas de globo como de paso tanto a la entrada como a la salida. En la figura 3.11 se puede apreciar las diferentes partes que conformaron el equipo experimental.

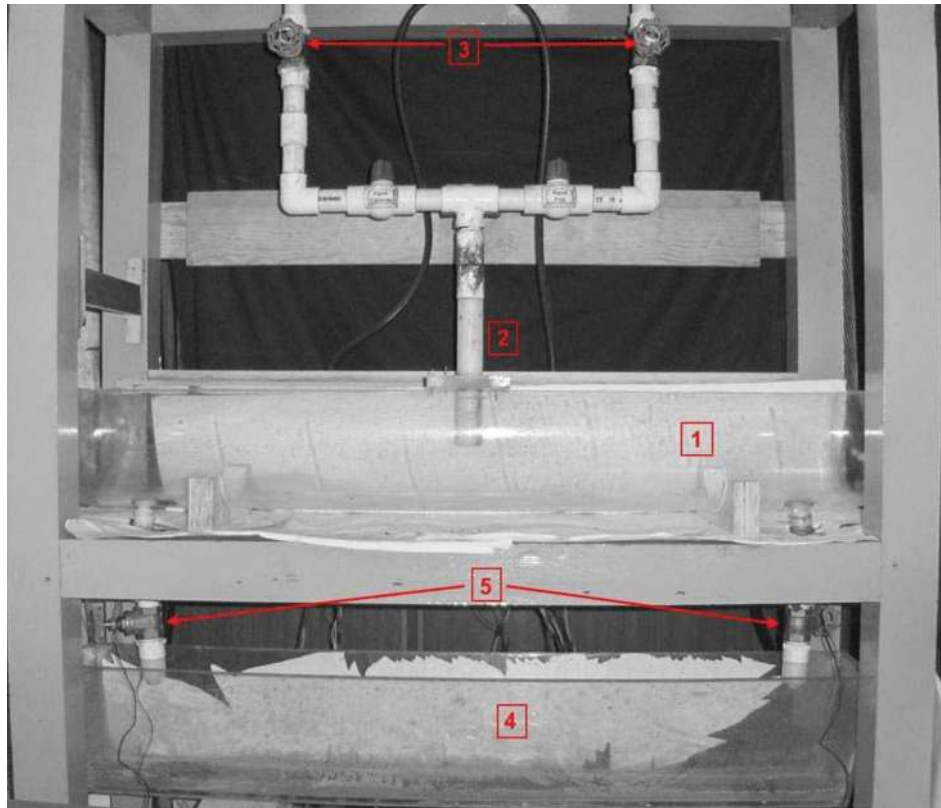


Figura 3.11 Equipo experimental utilizado en la simulación física.

Donde:

- 1.- Distribuidor de acrílico propuesto.
- 2.- Buza de entrada.
- 3.- Válvulas de calibración.
- 4.- Receptor de líquido.
- 5.- Buzas de salida

La olla de colada se simuló con un tanque de plástico de 120 litros conectado directamente a la línea de agua del laboratorio, con sus respectivas válvulas de control. Se tienen dos tanques de agua para cuando se requiere de simular casos anisotérmicos, en ese caso un depósito tiene agua caliente y el otro agua fría, figura 3.12.



Figura 3.12 Tanques de plástico que simulan ollas de colada.

3.3.2 Instrumentación del Equipo.

La obtención de las curvas de Distribución de Tiempos de Residencia se logra monitoreando la conductancia de un trazador que se adiciona, a un cierto tiempo, al fluido de trabajo, agua, en las salidas del modelo físico o distribuidor.

Para la medición de la conductividad en el sistema, se construyó un transductor a partir de una sección cilíndrica de Nylamid. El transductor consiste en la inserción de dos anillos de grafito en las buzas de salida, figura 3.13, y de esta forma tiene la doble función; la primera como elemento de descarga y la segunda se convierte en una celda de conductividad. Cabe resaltar que debido a la inserción de los anillos de grafito en las buzas de salida, éstas se volvieron sumamente frágiles y delicadas de manipular por lo que una vez ensambladas en las válvulas de salida no fueron removidas. En la figura 3.14 se puede observar las buzas de salida ensambladas al distribuidor propuesto.

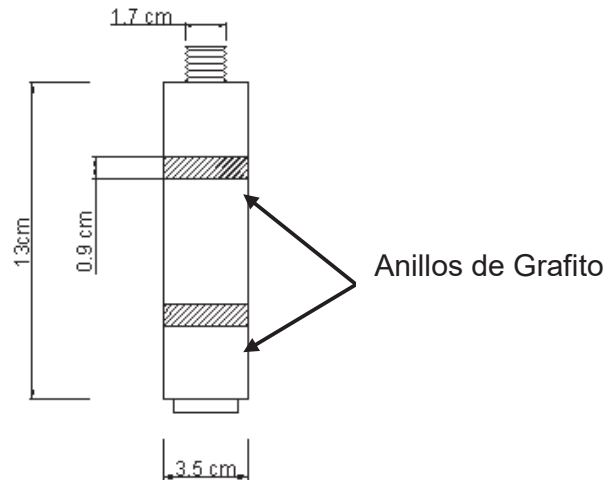


Figura 3.13 Configuración del transductor de conductividad.

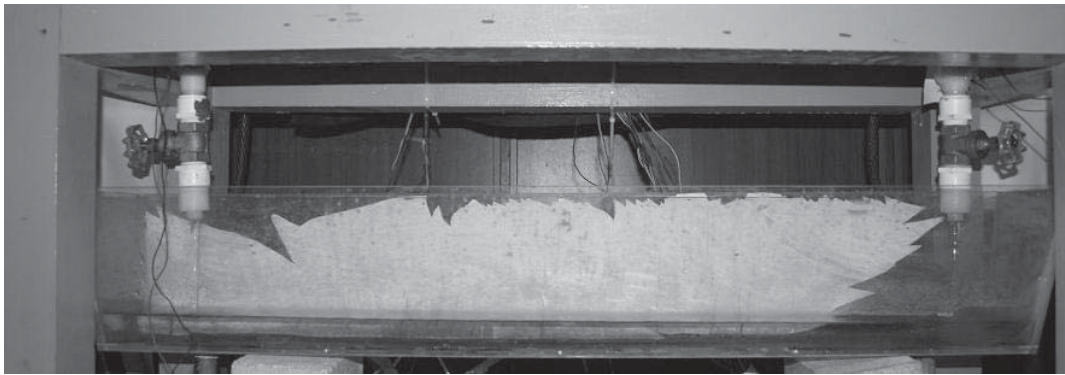


Figura 3.14 Disposición de los transductores de conductividad en el modelo.

3.3.2.1 Curva de Calibración.

Una curva de calibración es una curva de referencia construida con concentraciones conocidas del trazador cuyo resultado es una función matemática que describe las respuestas del sensor a lo largo de un rango de concentraciones y por medio de la cual se determina la concentración de una muestra desconocida basándose en la respuesta del sensor. Se realizaron dos curvas de calibración una para cada una de las buzas las cuales se muestran en la figura 3.15.

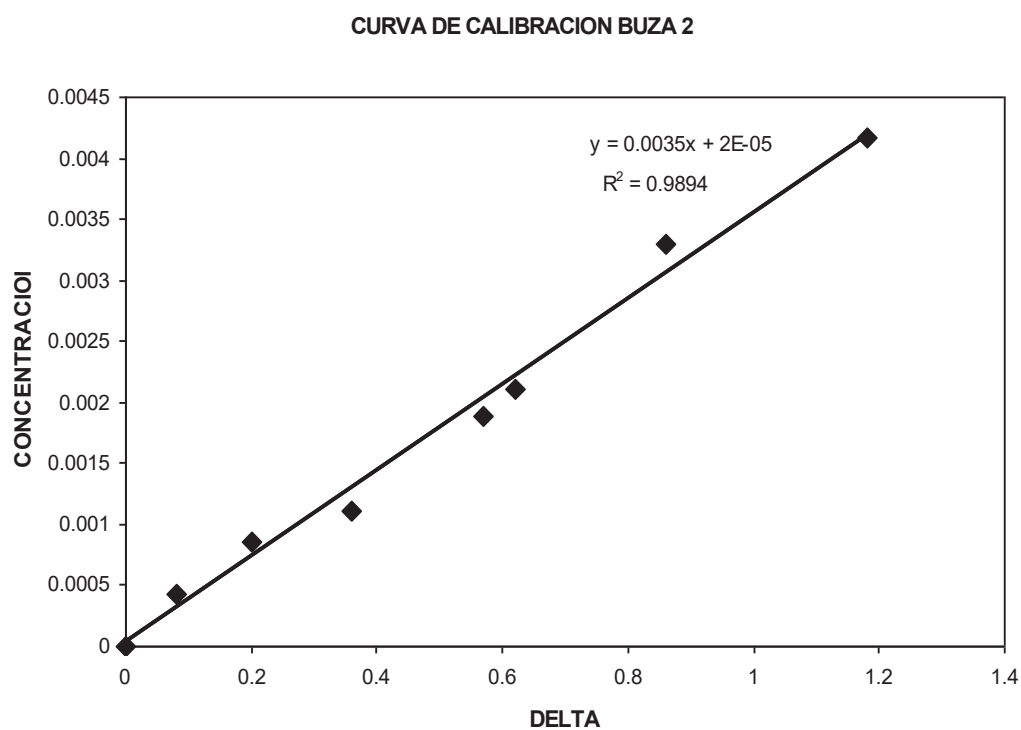
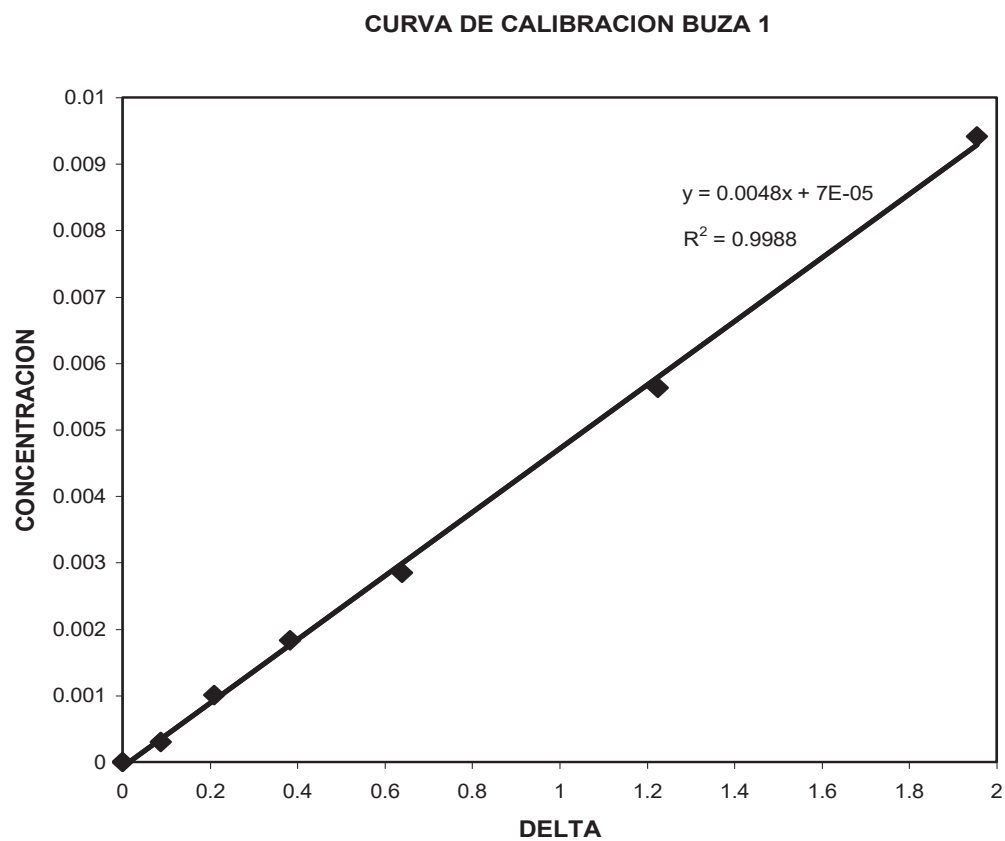


Figura 3.15. Curvas de calibración.

La diferencia en los rangos entre cada una de las curvas se debe a que se simuló primeramente con la buza número 1, observándose el comportamiento de la conductividad en el monitoreo y de esta forma reajustar las concentraciones para la calibración de la buza número 2.

3.3.2.2 Trazador y Colorante.

La sustancia utilizada como trazador fue el KCl de concentración 1.2M y densidad 1.086 g/ml. Como colorante fue utilizado el KMnO_4 1.5M y de densidad 1.1gr/ml.

3.3.3 Sistema de Adquisición de Datos.

El sistema de medición o monitoreo esta constituido por los siguientes componentes:

- Sensores de conductividad.
- Equipo de medición de la conductividad.
- Tarjeta de digitalización de señales y de adquisición de datos.
- Software para el monitoreo y tratamiento de las señales, LabVIEW™ 8.5
- Computadora Personal.

3.3.3.1 Equipo de Medición de la Conductividad.

La medición de la conductividad se llevó a cabo con un conductímetro marca Tacussel Electronique modelo CDRV62E, figura 3.16, de un solo canal de entrada para el transductor de conductividad.



Figura 3.16 Conductímetro Tacussel.

3.3.3.2 Tarjeta para la Digitalización de Señales.

Se utilizó únicamente una tarjeta para digitalizar las señales del transductor de conductividad ya que solo es posible el monitoreo independiente de cada una de las buzas de salida, restricción impuesta por tener un solo conductivímetro con un solo canal, es decir, para un solo transductor. Las principales características de la tarjeta utilizada son las siguientes:

- Modelo NI USB-6008.
- 8 entradas análogas sencillas o de cuatro diferenciales
- Resolución de 12 bits.
- Velocidad máxima de muestreo 10kM/s, es decir de 2,500 por canal/segundo



Figura 3.17 Tarjeta para la digitalización de señales analógicas.

3.3.3.3 Software para la Digitalización y Tratamiento de las Señales Analógicas.

El software utilizado para la digitalización y procesamiento de las señales es llamado lenguaje G y mejor conocido comercialmente como Labview®. Este es un software de programación gráfico basado en el concepto de instrumentación virtual bajo un ambiente de Windows Vista. Primeramente se elaboró un programa para la digitalización de las señales, es decir, para la fase de adquisición de datos y otro para el procesamiento de los datos digitalizados para la caracterización del flujo de fluidos. En las figuras 3.18 y 3.19 se pueden observar tanto la pantalla principal como la estructura gráfica del programa para la digitalización de señales respectivamente.

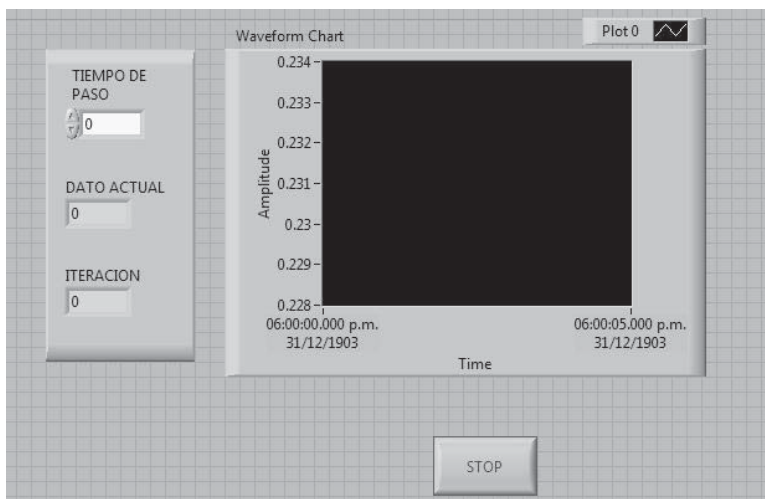


Figura 3.18 Pantalla principal del programa para la digitalización de señales.

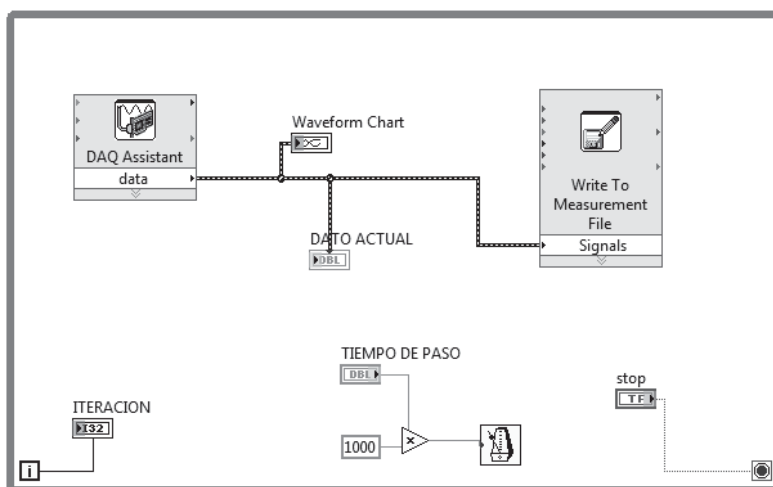


Figura 3.19 Estructura del programa para la digitalización de señales.

3.4 Distribución de Tiempos de Residencia y Caracterización del Flujo.

Los datos adquiridos del monitoreo de la conductividad se almacenan como archivos en formato ASCII (.txt). Estas señales son filtradas, de manera digital, para eliminar el ruido electrónico propio de éste tipo de transductores. Posteriormente se aplica el algoritmo para la caracterización de flujo de fluidos y así obtener las fracciones correspondientes del volumen mezclado, pistón y muerto. Lo mismo ocurre en la simulación matemática ya que las lecturas simuladas se almacenan igualmente en formato ASCII (.txt). y posteriormente son procesadas con un programa escrito bajo ambiente de LabVIEW™ en el

que se ha eliminado la parte del filtrado ya que al ser datos provenientes de una simulación digital no se hace necesaria esta fase.

El algoritmo de cálculo utilizado en la caracterización del flujo de fluidos se muestra a continuación:

1. Leer la señal obtenida de la experimentación.
2. Filtrado de la señal.
3. Calcular el tiempo medio de residencia.

$$\bar{t} = \frac{V}{Q} \quad (3.4)$$

4. Normalizar el tiempo.

$$\theta_i = \frac{t_i}{\bar{t}} \quad (3.5)$$

5. Normalizar la concentración.

$$C_i = \frac{c_i}{q/V} \quad (3.6)$$

6. Cálculo de la media y la varianza.

Media:

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_i C_i \theta_i}{\sum_i C_i} \quad (3.7)$$

Varianza:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_i \theta_i^2 C_i}{\sum_i C_i} - \bar{\theta}^2 \quad (3.8)$$

7. Cálculo del parámetro de dispersión.

$$\left(\frac{D_e}{UL} \right) = \frac{\sigma^2}{2} \quad (3.9)$$

8. Aplicación del modelo de dispersión.

$$C_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta(D/uL)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/uL)}\right] \quad (3.10)$$

9. Cálculo del tiempo medio de residencia.

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{\theta=0}^{\infty} C_{\theta}\theta_i}{\sum_{\theta=0}^{\infty} C_{\theta}} \quad (3.11)$$

10. Cálculo del tiempo medio de residencia hasta $\theta = 2$

$$\bar{\theta}_{cl} = \frac{\sum_{\theta=0}^2 C_{\theta}\theta_i}{\sum_{\theta=0}^2 C_{\theta}} \quad (3.12)$$

11. Calcular el área bajo la curva hasta $\theta = 2$, correspondiente a la región activa. $(\frac{Q_a}{Q})$

12. Calcular θ_c

$$\bar{\theta}_C = \frac{\bar{\theta}_{cl}}{\theta} \quad (3.13)$$

13. Calcular el volumen muerto.

$$V_{dv} = 1 - \frac{Q_a}{Q} * \bar{\theta}_C \quad (3.14)$$

14. Calcular el volumen pistón y el volumen mezclado.

$$V_{pv} = \frac{(\theta_{\min} + \theta_{peak})}{2} \quad (3.15)$$

$$V_{mv} = 1 - V_{dv} - V_{pv} \quad (3.16)$$

La estructura del programa, en lenguaje gráfico, está hecha a base de subrutinas, y su estructura gráfica se muestra en las figuras 3.20 - 3.24.

Primeramente la subrutina relativa al filtrado de la señal y a la normalización tanto del tiempo como de la concentración, lo cual corresponde a los primeros cinco pasos del algoritmo anterior.

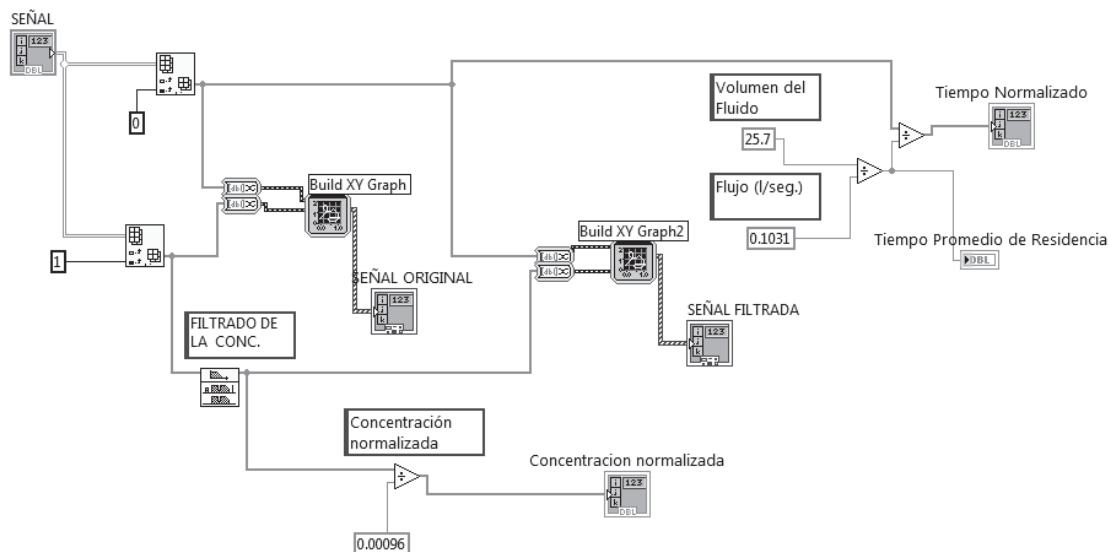


Figura 3.20 Estructura gráfica del filtrado y normalización.

Posteriormente se establece una subrutina para el cálculo del parámetro de dispersión y la aplicación del modelo, comprendiendo los pasos 6, 7 y 8 del algoritmo.

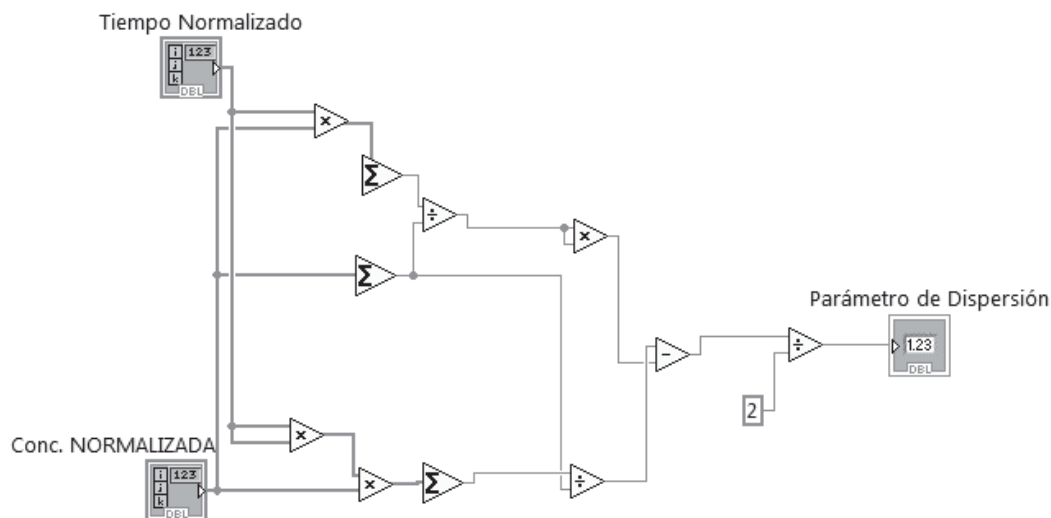


Figura 3.21 Estructura gráfica para el cálculo del parámetro de dispersión.

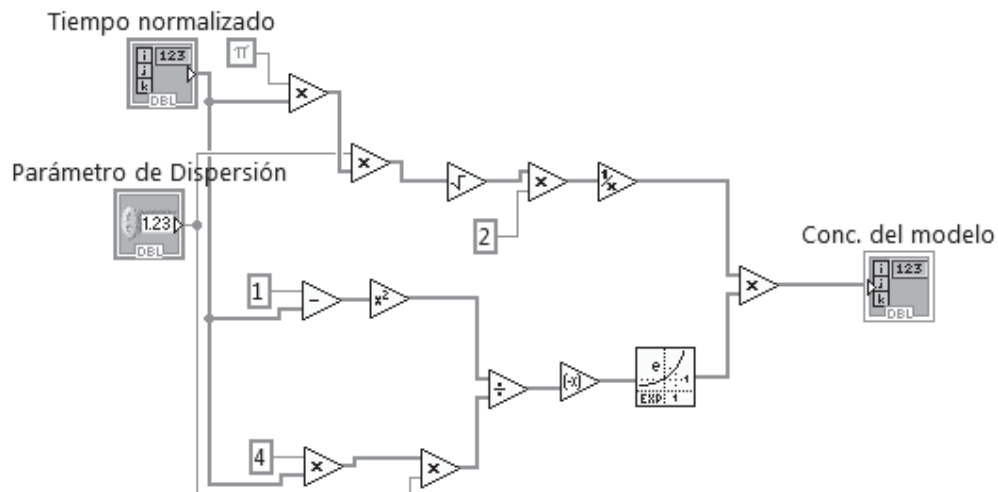


Figura 3.22 Subrutina para la aplicación del modelo de dispersión.

El último paso es crear una subrutina para el cálculo del volumen muerto y pistón correspondiendo a los pasos 9 a 14 del algoritmo.

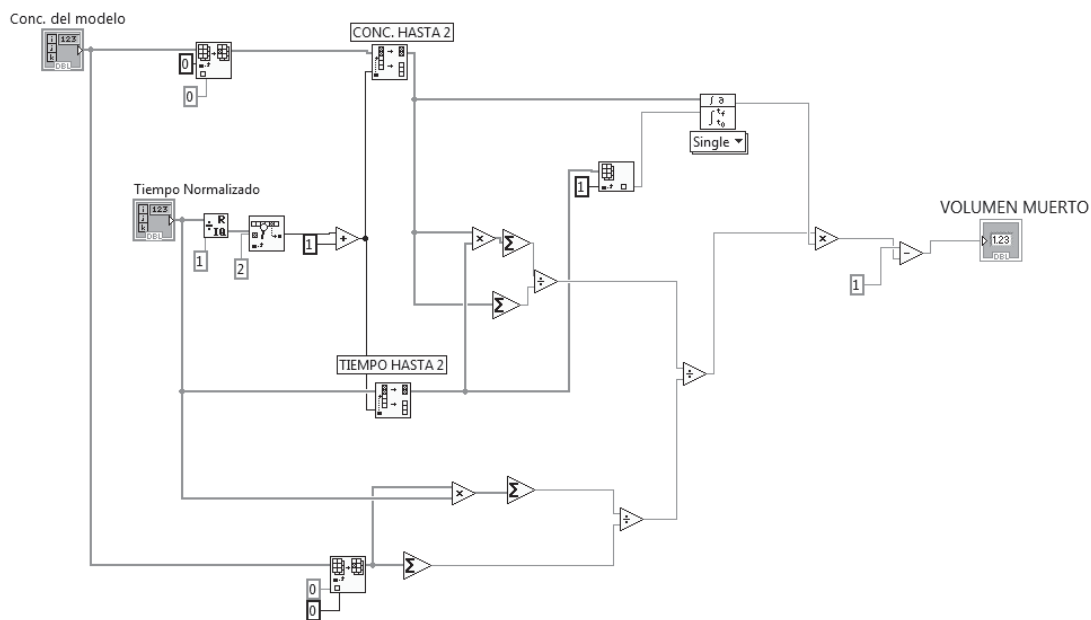


Figura. 3.23 Subrutina para el cálculo del volumen muerto.

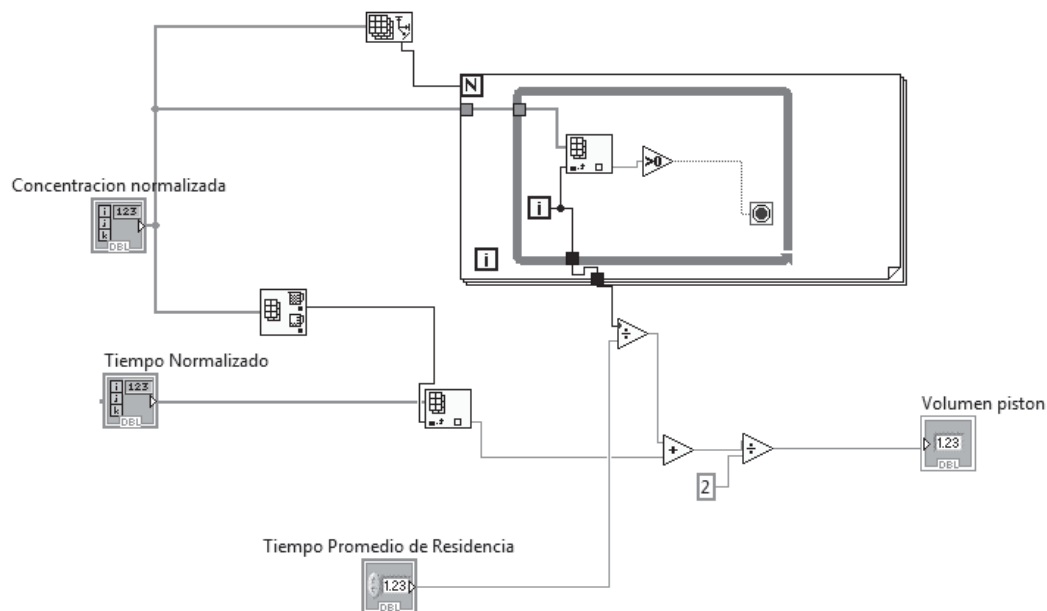


Figura 3.24. Subrutina para el cálculo del volumen pistón.

El esquema del acoplamiento de las diversas subrutinas mencionadas así como su pantalla principal se observa en las figuras 3.25 y 3.26.

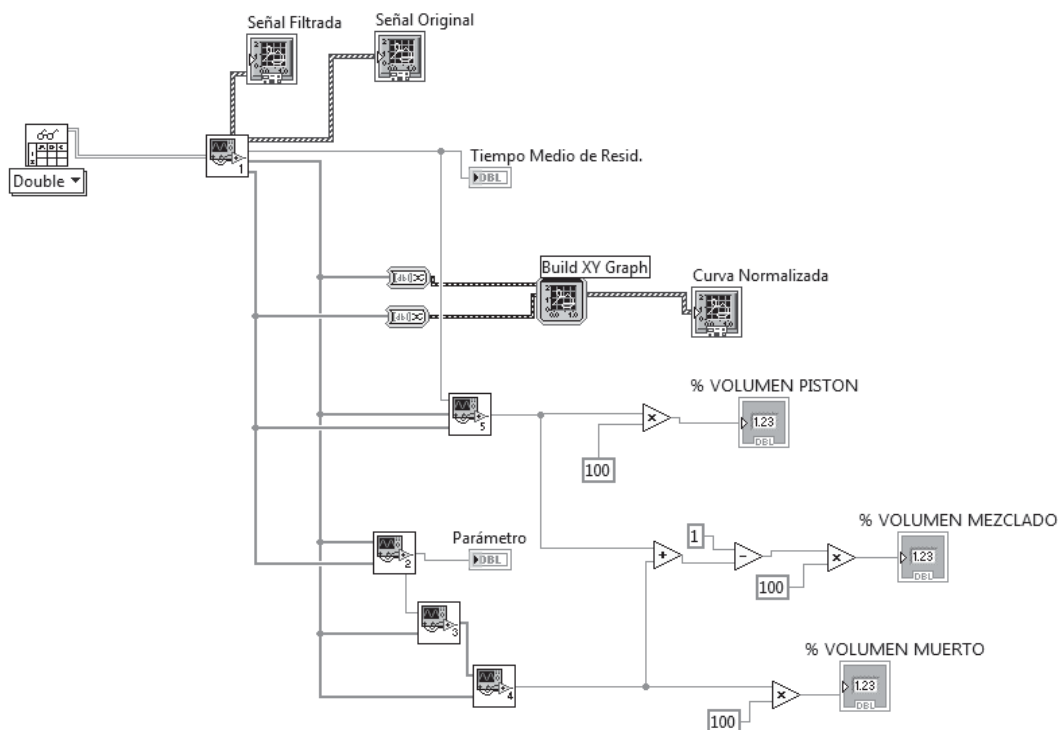


Figura 3.25 Estructura gráfica del programa para caracterizar el flujo de fluidos.

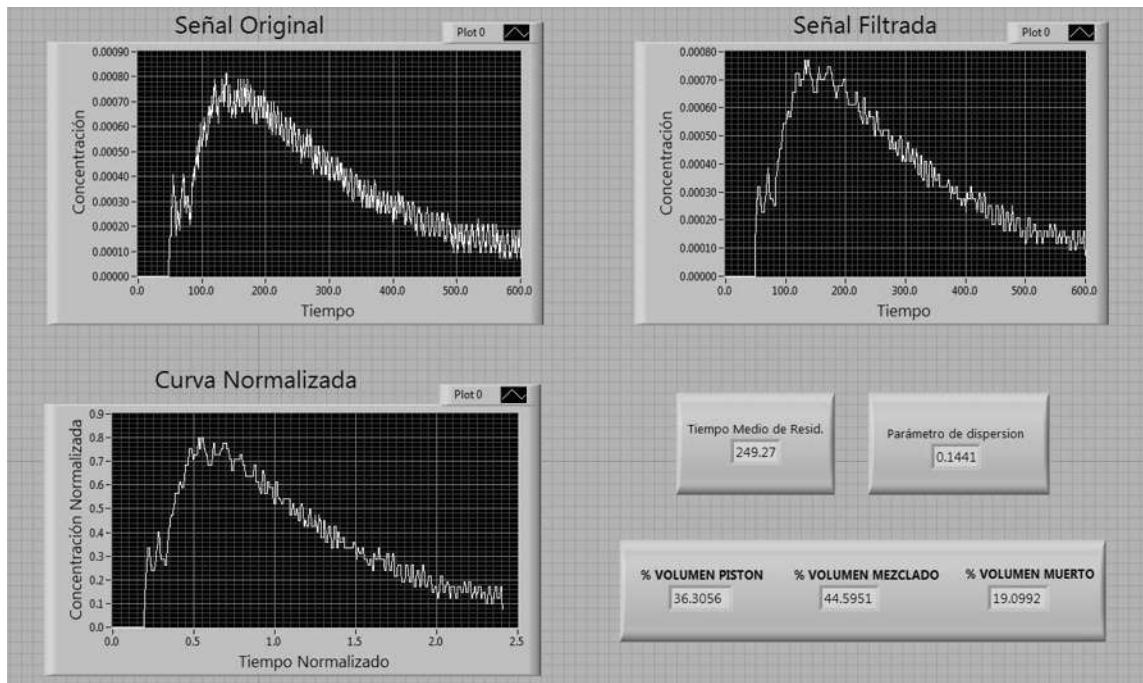


Figura 3.26 Pantalla principal del programa para caracterizar el flujo de fluidos.

3.5 Experimentos.

Primeramente se simuló matemáticamente el distribuidor modificado del distribuidor tipo recto, es decir, el distribuidor propuesto que cuenta con una capacidad aproximada de 60 toneladas, fase I. Posteriormente se simuló el mismo diseño de distribuidor con una capacidad de 40 toneladas, fase II, ya que está es la capacidad del distribuidor tipo recto tomado como base para las modificaciones. Finalmente después de analizar los resultados de la segunda fase, se propuso realizar un corte de una sección transversal del distribuidor, el cual se puede observar en la figura 3.27. En la tabla 3.1 se presenta de manera resumida los experimentos llevados a cabo en esta investigación.

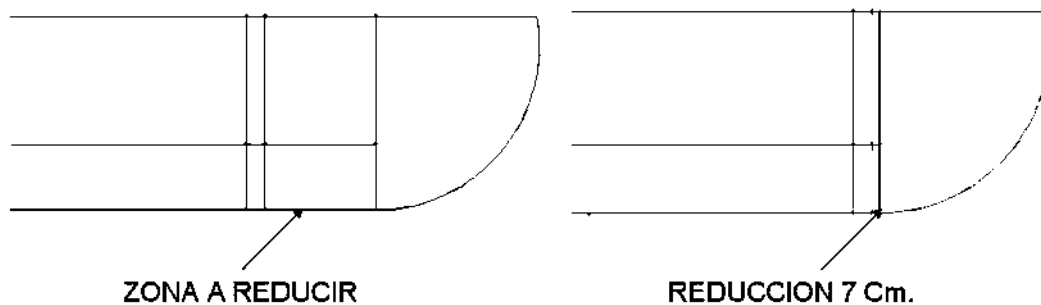


Figura 3.27 Modificación al distribuidor propuesto.

Tabla 3.I Experimentos efectuados.

	Capacidad	Modelado Matemático	Geometría	Malla (Celdas)	Modelado Físico
Caso 1	60 Toneladas	Se llevó a cabo	Completa	76000	
Caso 2	40 Toneladas	Se llevó a cabo	Completo	57000	Se llevó a cabo
Caso 3			Un cuarto	15000	
Caso 4	40 Toneladas con reducción	Se llevó a cabo	Un cuarto	31000	

3.6 Resumen.

El distribuidor propuesto representa un diseño completamente innovador en el campo de los distribuidores de colada continua, teniendo una geometría cilíndrica con extremos semiesféricos. El estudio del comportamiento fluidinámico del sistema se efectuó por medio de simulación matemática y física. La simulación matemática se llevó a cabo en el paquete de simulación Fluent® y su preprocesador Gambit® en el cual se realizó el mallado del sistema. Debido a la complejidad del sistema se hizo uso de un mallado híbrido, es decir consistente de zonas con malla estructurada y otras regiones con malla no estructurada. La resolución del sistema se llevó a cabo en Fluent® utilizando los parámetros de solución, como criterio de convergencia y factores de relajación que vienen por default en el código. Por su parte para la modelación física se construyó un modelo del distribuidor a escala hecho de acrílico y como fluido de trabajo se utilizó agua. En la simulación física por medio de la inyección de un trazador, de densidad semejante a la del agua, se obtiene la curva de distribución de tiempos de residencia y a partir de ella caracterizar el flujo de fluidos. El monitoreo de la concentración del trazador a la salida del distribuidor se efectuó al adaptarle dos anillos de grafito a las buzas de salida. La digitalización de las señales así como la caracterización del flujo de fluidos se llevó a cabo por medio del software de lenguaje gráfico Labview®.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 Distribuidor de 60 Toneladas.

La primera etapa de la investigación consistió en el estudio de la fluidinámica del distribuidor de colada obtenido directamente de la modificación del distribuidor tipo recto. La capacidad del distribuidor propuesto es de 60 toneladas lo que constituye un aumento en la capacidad del 50% respecto a la capacidad del distribuidor tipo recto.

La fluidinámica del sistema es descrita por medio de planos virtuales creados sobre el distribuidor una vez que la simulación ha convergido. Los patrones de flujo se pueden observar principalmente por medio de vectores y contornos de velocidad.

Tomando como referencia las figuras 4.1 a 4.4 se puede observar que, primeramente sobre el plano longitudinal central del distribuidor así como en un plano longitudinal cercano a la pared se ve claramente como el fluido tiende avanzar principalmente a través de las paredes laterales del distribuidor y no por el fondo. Esto se confirma al observar que el fluido choca con el fondo del distribuidor y una parte de éste tiende a avanzar por el fondo encontrándose posteriormente con el fluido que viene en sentido contrario. El movimiento del fluido hacia la entrada es provocado por la succión del chorro de entrada del distribuidor. Además también se puede visualizar que la zona del casquete semiesférico tiene velocidades muy bajas por lo que es una zona de altos volúmenes muertos.

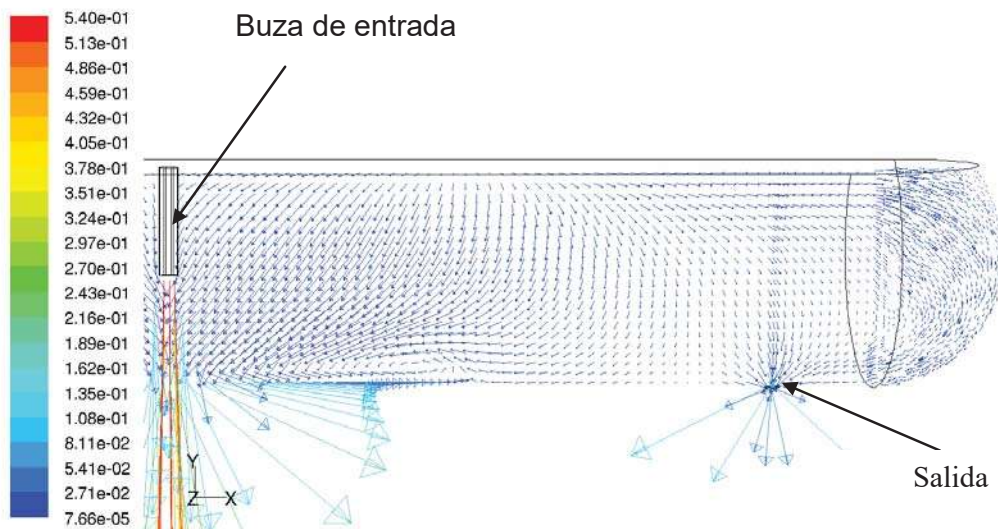


Figura 4.1 Comportamiento del fluido a lo largo del distribuidor. (plano longitudinal central).

Succión del fluido debido
al chorro de entrada

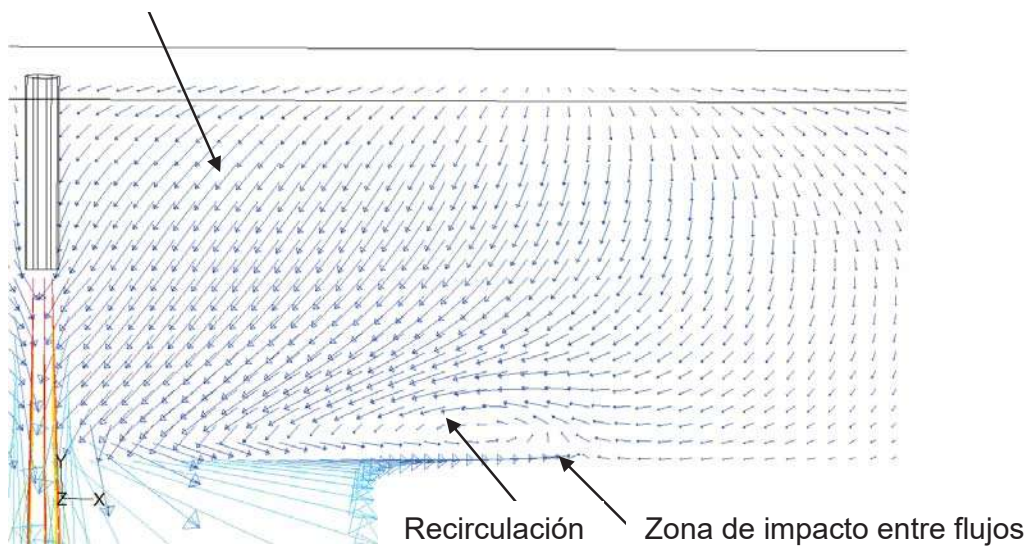


Figura 4.2 Comportamiento del fluido alrededor de la zona de entrada.

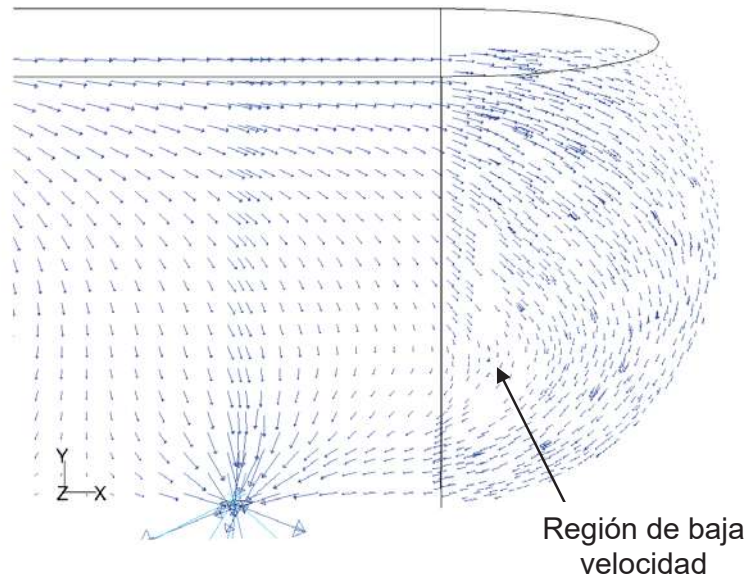


Figura 4.3 Comportamiento del fluido en el casquete semiesférico del distribuidor.

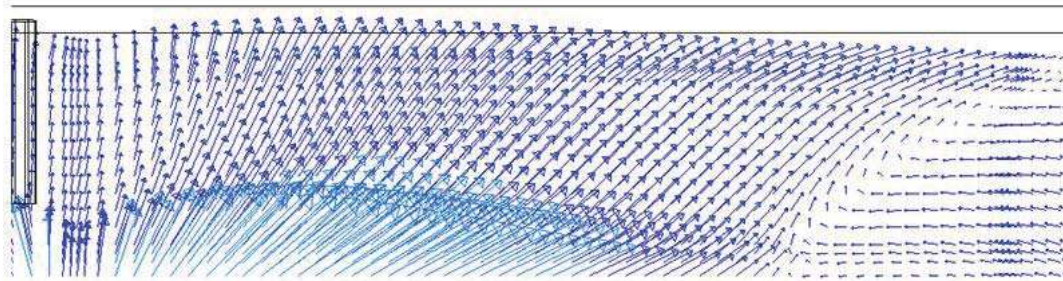


Figura 4.4 Comportamiento del fluido en un plano longitudinal cercano a la pared.

En el plano transversal de la zona de entrada, el cual se muestra en la figura 4.5, se observa como al impactarse el fluido con el fondo del distribuidor, tiende a subir por las paredes del distribuidor de forma **contenida** formando una recirculación y un movimiento del fluido tipo pistón y a la vez suave a lo largo de las paredes del distribuidor.

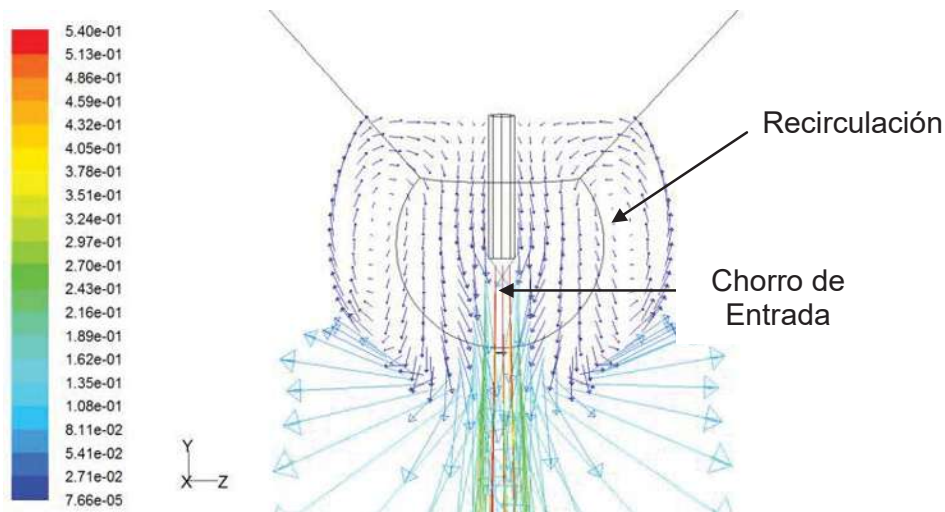


Figura 4.5. Comportamiento del fluido en la zona de entrada (plano central transversal).

En la región correspondiente a la superficie libre del distribuidor, el fluido presenta un comportamiento asimétrico en la zona del casquete semiesférico, figura 4.6, ya que se observa una recirculación bien definida en uno de sus lados, y en el lado opuesto se observa una recirculación que no está bien definida, esto se le atribuye más al mallado no estructurado que al fenómeno físico en sí, además se confirma que en esta zona se tienen velocidades muy bajas.

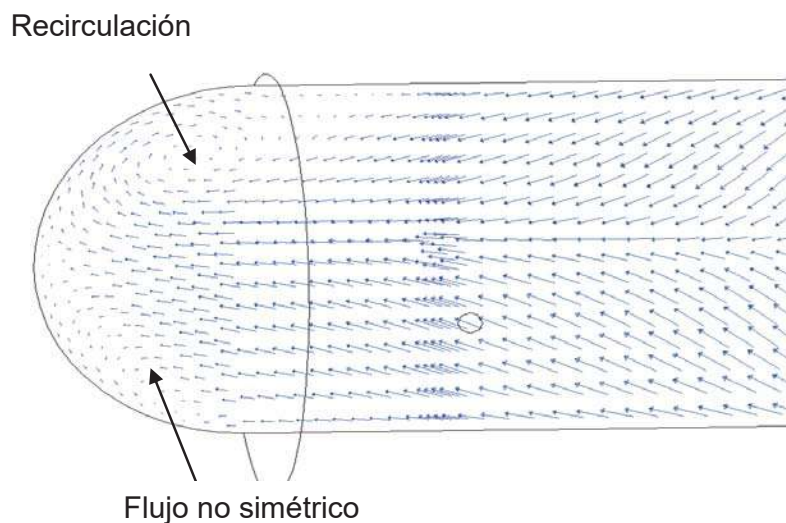


Figura 4.6. Comportamiento asimétrico del fluido sobre la superficie libre.

En esta misma región de la superficie libre, en la zona de la entrada se observa claramente el efecto que tiene la curvatura, figura 4.7, ya que provoca que el fluido se mueva hacia el centro en dirección a la buza de entrada del acero, haciendo esta zona muy estable, lo cual evitaría la apertura de la capa de escoria.

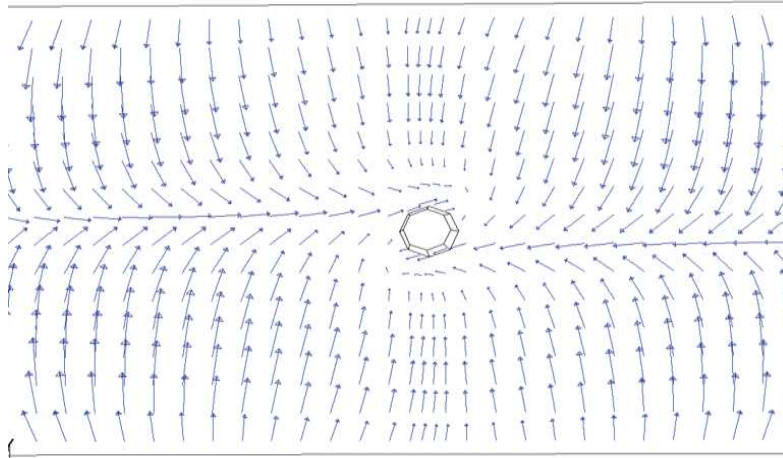


Figura 4.7 Comportamiento del fluido sobre la superficie libre (zona de entrada).

El comportamiento asimétrico en los casquetes semiesféricos del distribuidor, tiene varias cosas interesantes que discutir, entre ellas que este comportamiento se puede deber a una falta de exactitud en la solución o a la aplicación de otra variante del modelo $k-\varepsilon$. El criterio de convergencia utilizado para las simulaciones anteriores es de 10^{-3} y con el fin de comprobar la influencia de la exactitud sobre la solución se realizó una prueba aumentando este criterio a 10^{-4} . Sin embargo, los resultados obtenidos de este ensayo muestran una solución divergente en la zona de entrada lo cual empobrece significativamente la solución. Lo anterior puede ser apreciado en las figuras 4.8 y 4.9.

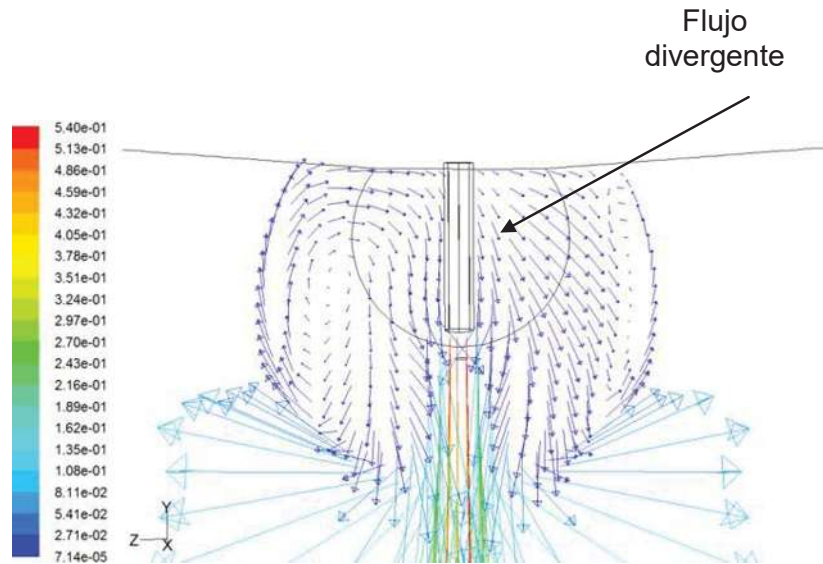


Figura 4.8 Flujo divergente en el plano transversal a la entrada.

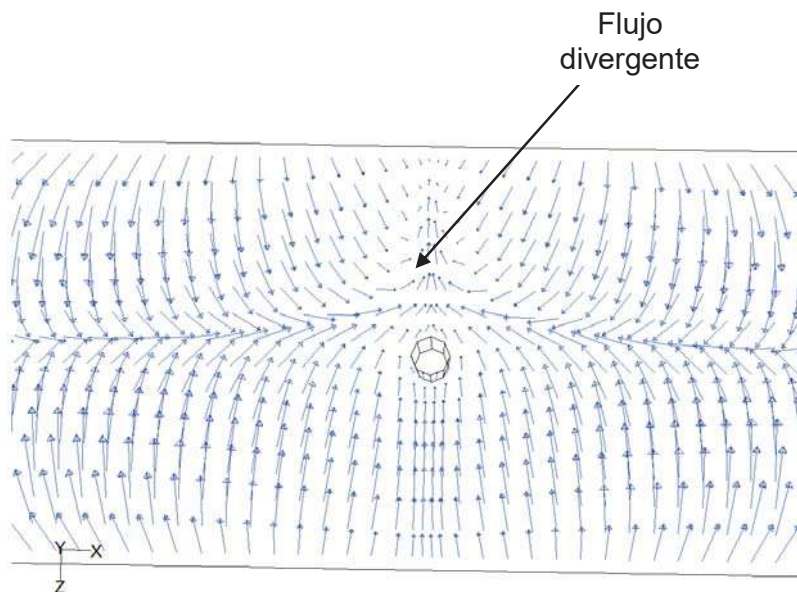


Figura 4.9 Flujo divergente en la zona de la entrada (superficie libre).

La simulación con el modelo $k-\varepsilon$ realizable arrojó el mismo comportamiento asimétrico en la zona del casquete semiesférico, mostrado en la figura 4.10, y en general en todo el distribuidor respecto al modelo estándar.

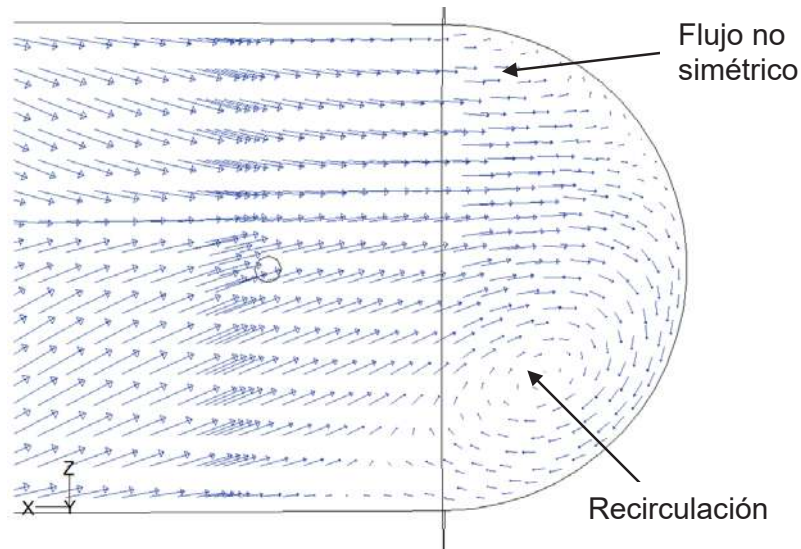


Figura 4.10. Comportamiento asimétrico del modelo $k-\varepsilon$ realizable en los casquetes semiesféricos (superficie libre).

Con estas simulaciones efectuadas se reafirma la primera hipótesis acerca de que la causa del comportamiento asimétrico de los casquetes semiesféricos se debe principalmente a que en esta zona existe una malla no estructurada. El tener una malla no estructurada en esta zona del distribuidor implica que si se trazara un eje de simetría en el casquete semiesférico, cada uno de sus lados tendría un número diferente de celdas. Cabe recordar que la aplicación de una malla estructurada en esta zona, no es factible debido a la geometría de esta parte del sistema.

Otro de los fenómenos importantes en el estudio de la fluidinámica en el distribuidor es el circuito corto, el cual es altamente perjudicial para la limpieza del acero. El circuito corto es un fenómeno que tiene lugar cuando el acero entrante se dirige directamente a la salida del distribuidor, lo cual provoca que el acero no tenga oportunidad de homogeneizarse tanto en temperatura y composición, o no tenga el tiempo suficiente para flotar inclusiones. La presencia de éste fenómeno es comprobada por medio de contornos de velocidad mostrados en la figura 4.11, los cuales representan por medio de colores las diferentes velocidades existentes en diversas zonas en el distribuidor.

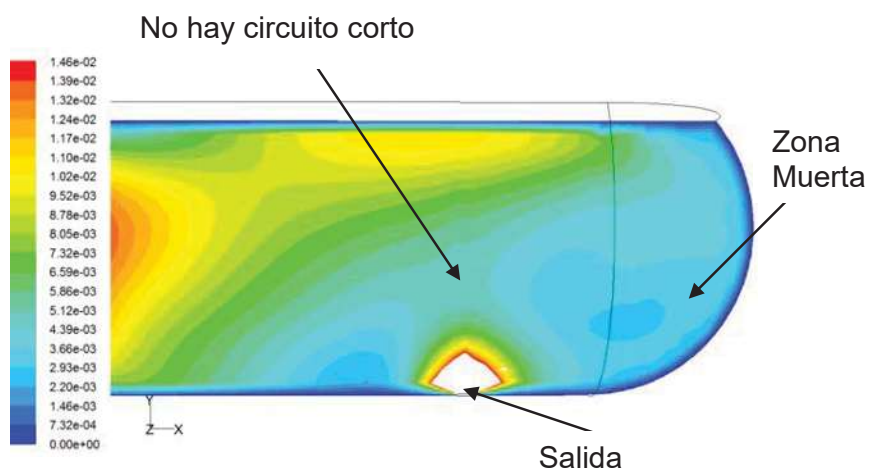


Figura 4.11. Contornos de velocidad en el plano longitudinal central.

4.1.1 Caracterización del Flujo del Distribuidor de 60 Toneladas.

Una vez obtenidos los patrones de flujo de fluidos en el distribuidor, la siguiente etapa consiste en caracterizar este flujo. La caracterización del flujo de fluidos por medio de la simulación matemática se obtiene a partir de monitorear *virtualmente* la concentración de un trazador inyectado a la corriente de entrada en cada una de las salidas del distribuidor. La gráfica de la distribución de tiempos de residencia (DTR) para cada una de las salidas así como las fracciones de flujo se muestra en la figura 4.12 y en la tabla I. respectivamente

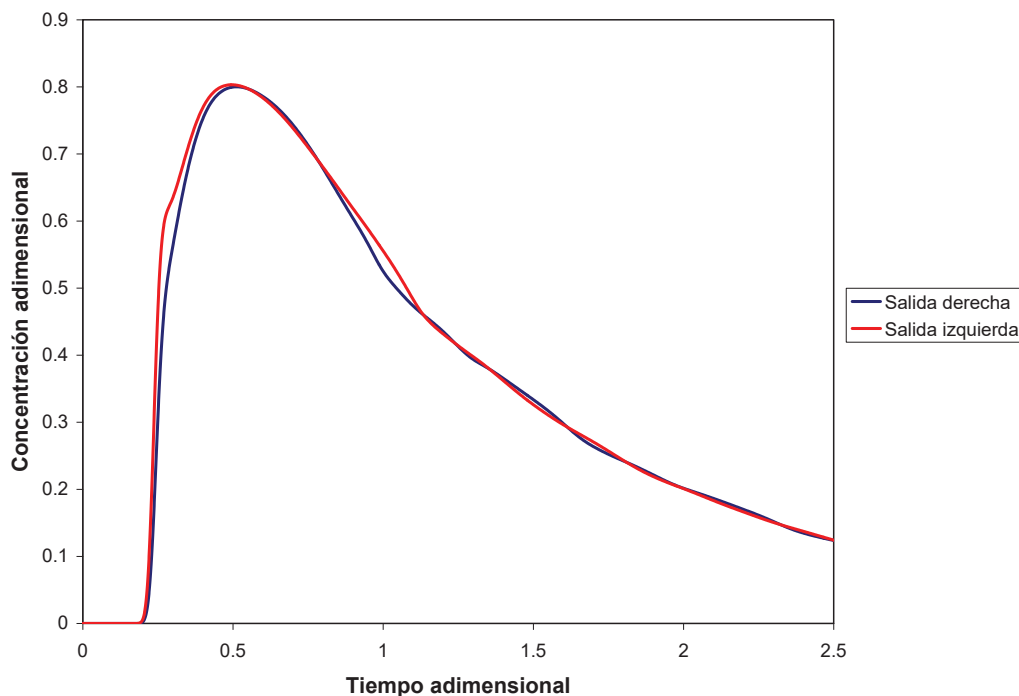


Figura 4.12. Distribución de tiempos de residencia simulada matemáticamente para la capacidad de 60 toneladas.

Tabla 4.I. Caracterización matemática del flujo de fluidos para el distribuidor de 60 toneladas

	Volumen Pistón	Volumen Mezclado	Volumen Muerto
Salida Derecha	34.8 %	42.6 %	22.6 %
Salida Izquierda	33.4%	43.9%	22.7%

Las fracciones de flujo de la Tabla 4.I muestran una gran cantidad de volumen muerto presente en el sistema, lo cual es el factor crítico en el diseño de un distribuidor. Este valor es mayor en comparación con los valores reportados por Barreto ^[6] y colaboradores para un distribuidor tipo recto sin modificadores de flujo, siendo el aumento del flujo muerto de un 20% aproximadamente. Sin embargo un aspecto positivo lo constituye la alta fracción de flujo pistón, mayor al 30%, lo cual es buscado para aumentar la eficiencia en la eliminación de inclusiones, de acuerdo a lo postulado por Ahuja y Sahai ^[5]. La diferencia existente entre las fracciones de flujo de las dos salidas se debe a que no existe una simetría perfecta en la malla si se traza un plano transversal en la zona de entrada, esto se debe a la aplicación del

mallado no estructurado, el cual en el preprocesador se efectúa de forma automática.

4.2 Distribuidor de 40 Toneladas.

La siguiente etapa en la modelación matemática fue la simulación del distribuidor con una capacidad de 40 toneladas, la cual además de ser la capacidad más utilizada en el distribuidor tipo recto, es la capacidad a la cual se realizó la validación del modelo por medio de la simulación física.

Para esta capacidad se simuló el distribuidor completo así como un cuarto de éste. Encontrándose el mismo comportamiento asimétrico en la zona de los casquetes semiesféricos para la geometría completa, lo cual se puede apreciar en la figura 4.13, en la cual se hizo uso de una función especial del software, la cual asigna el mismo tamaño a todos los vectores, para visualizar de una mejor forma el comportamiento citado. Esta condición asimétrica imperante fue la razón principal para simular el sistema utilizando la condición de simetría.

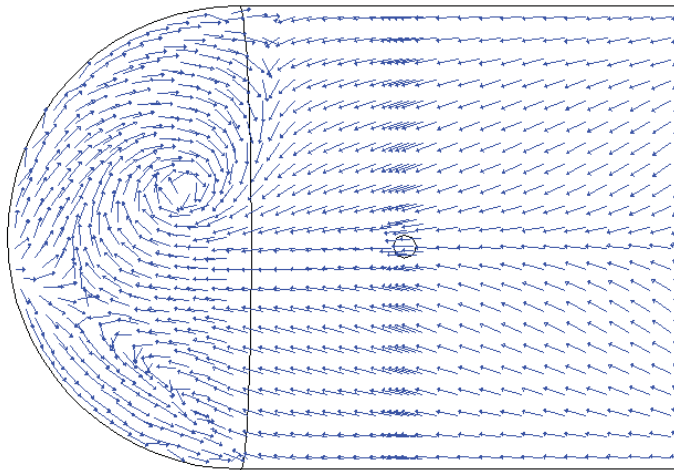


Figura 4.13. Comportamiento asimétrico en la superficie libre del distribuidor de 40 toneladas.

El comportamiento general del fluido es el mismo que para la capacidad anterior, sin embargo para esta capacidad el fluido muestra una mayor dinámica debido a la disminución en el nivel del acero en el distribuidor, figura

4.14. Además en la zona del casquete semiesférico sigue existiendo una gran cantidad de volumen muerto, observándose esto en las figuras 4.15 y 4.16.

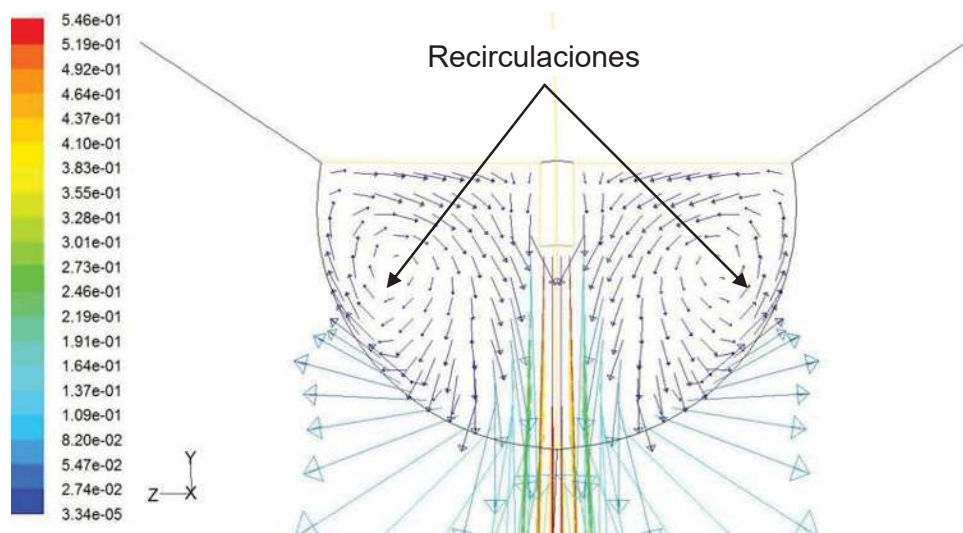


Figura 4.14. Comportamiento del fluido en el plano transversal a la entrada, (distribuidor de 40 toneladas).

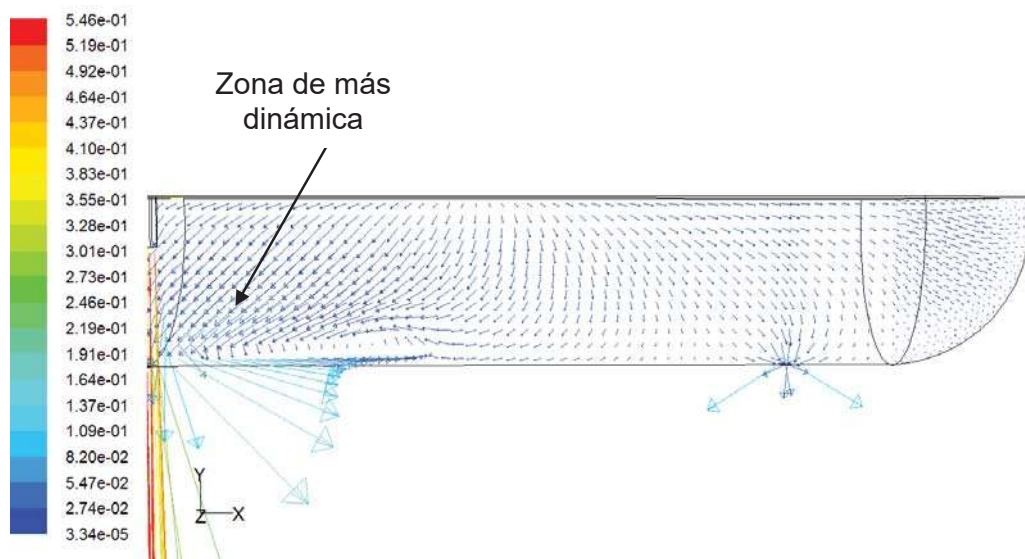


Figura 4.15. Comportamiento del fluido sobre el plano longitudinal central.

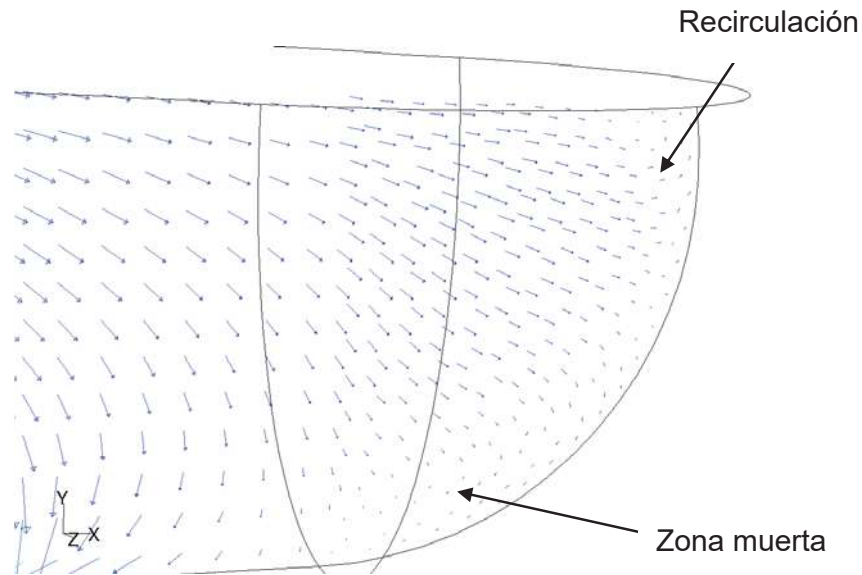


Figura 4.16 Comportamiento del fluido en la zona del casquete semiesférico.

La recirculación ubicada en la parte superior del casquete semiesférico, mostrada en la figura 4.16, provoca que esta zona en su superficie tenga un movimiento muy lento como se puede observar en la figura 4.17.

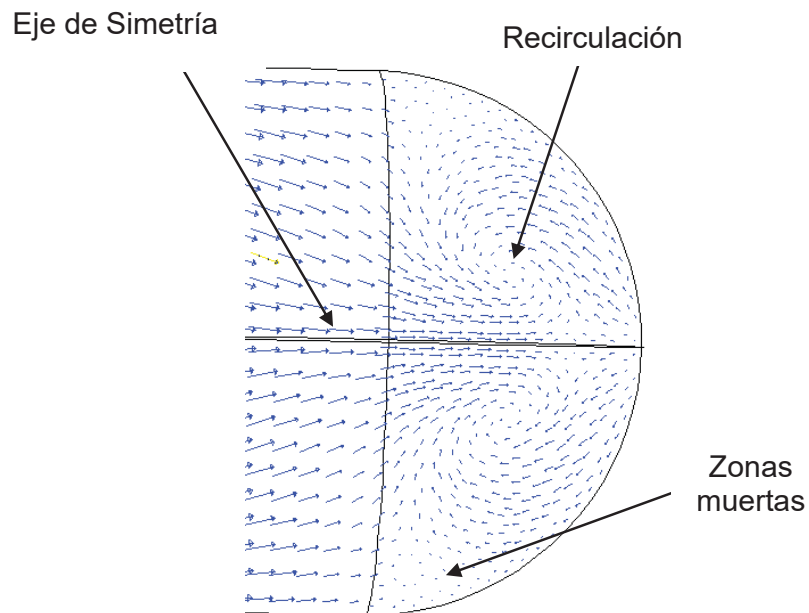


Figura 4.17. Comportamiento del acero en la zona del casquete semiesférico, (Plano superior).

El aumento de las velocidades en la zona de la entrada así como en sus alrededores producto de la disminución del nivel del acero puede ser apreciado en las figuras 4.18 y 4.19 mediante la comparación de los contornos de velocidad de las dos capacidades.

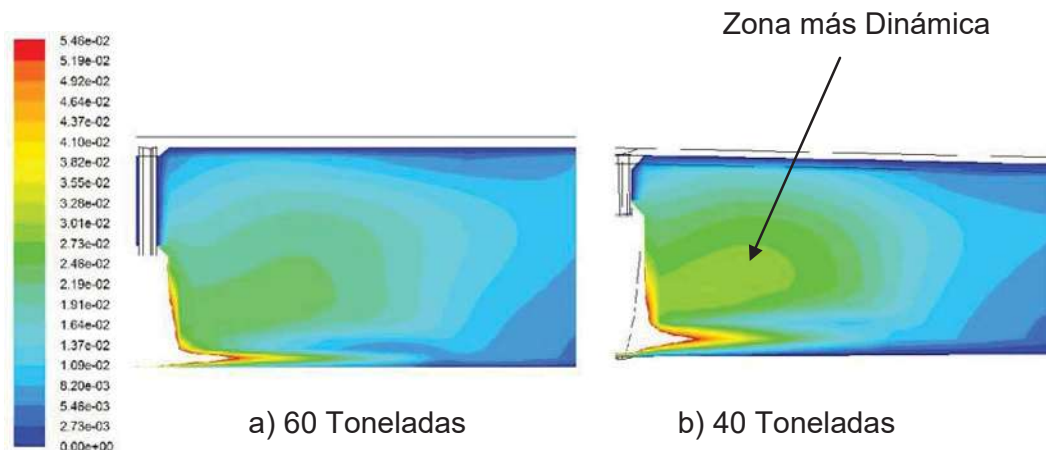


Figura 4.18. Comparación de los contornos de velocidad para las dos capacidades. (Plano longitudinal).

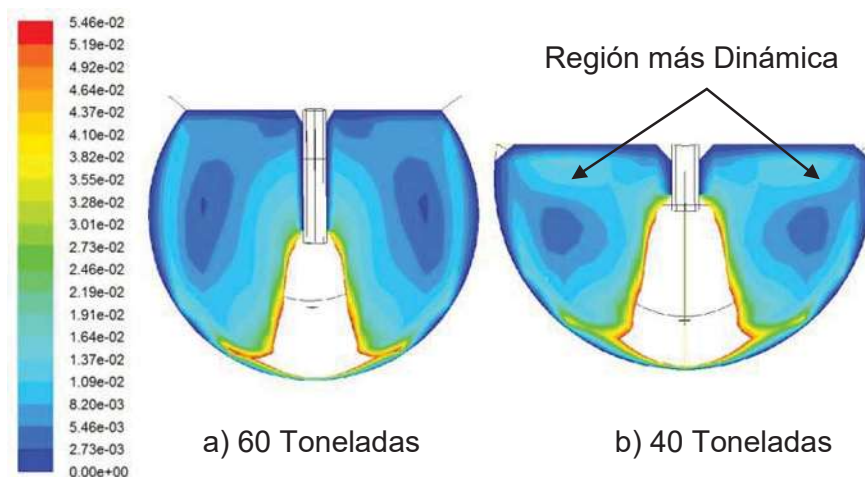


Figura 4.19. Efecto de la disminución de nivel del acero en la dinámica del acero. (plano transversal a la entrada).

La presencia de zonas de mayor velocidad en el distribuidor de 40 toneladas es provocada por el hecho de que el fluido tiene una menor área de contacto con las paredes laterales del distribuidor en su ascenso hacia la superficie perdiendo menos velocidad. La disminución de nivel provoca un

circuito corto, el cual es un fenómeno muy frecuente al disminuir el nivel del acero del líquido, esto puede ser observado en la figura 4.20.

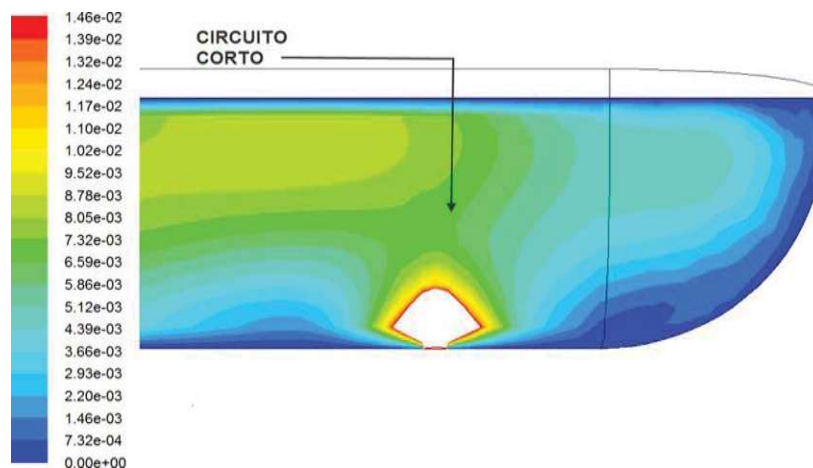


Figura 4.20. Contornos de velocidad en el plano longitudinal central (40 toneladas).

4.2.1 Caracterización del Flujo del Distribuidor de 40 Toneladas.

Para la caracterización del flujo para una capacidad de 40 toneladas únicamente se monitoreó virtualmente una de las salidas esto debido a la condición de simetría utilizada. La curva de distribución de tiempos de residencia para esta capacidad así como sus fracciones de flujo se muestra en la figura 4.21 y en la tabla 4.II respectivamente.

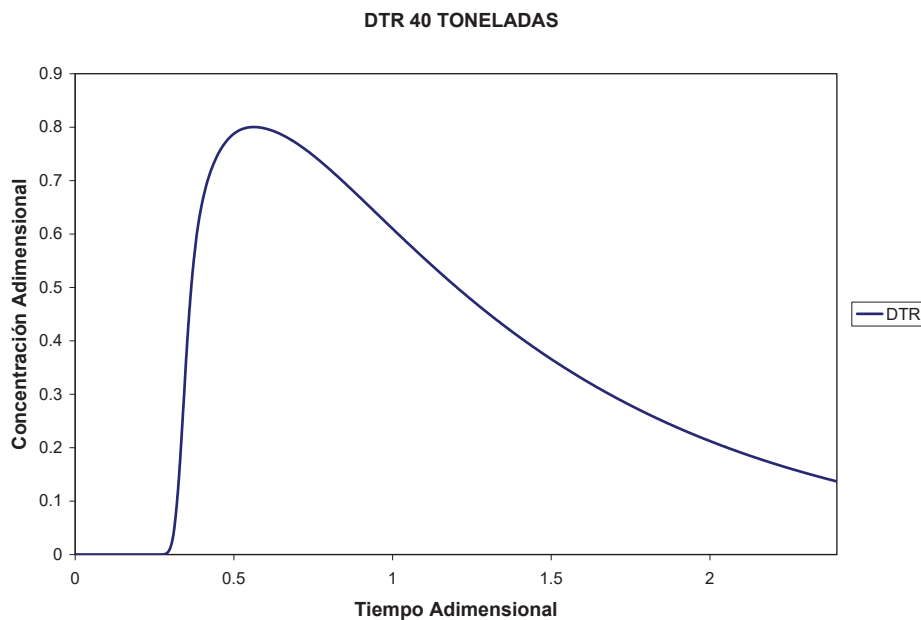


Figura 4.21. Curva de Distribución de Tiempos de Residencia (40 toneladas).

Tabla 4.II. Caracterización matemática del flujo de fluidos (40 Toneladas).

Capacidad (Ton.)	Volumen Pistón	Volumen Mezclado	Volumen Muerto
40	39.5 %	42.4 %	18.1%
60	34.1%	43.2%	22.6%

La fracción de volumen muerto para esta capacidad es prácticamente la misma que la reportada por Barreto y colaboradores ^[6] para un distribuidor tipo recto, la cual es una fracción alta de volumen muerto. Al disminuir la capacidad del distribuidor disminuyó también la fracción de volumen muerto en aproximadamente un 20%.

El aumento en la capacidad del distribuidor con el mismo flujo trae consigo el aumento en la fracción de volumen muerto, esto debido a que el fluido tiende a irse a través de las paredes, perdiendo velocidad al pasar a través de ellas, por lo que al llegar el fluido a la zona de los casquetes semiesféricos, éste lo hace con una velocidad menor ocasionándose este aumento en la fracción de volumen muerto.

4.3 Simulación Física.

La simulación física tiene como uno de sus objetivos el validar los resultados de la simulación matemática, visualizando el flujo del fluido por medio de la inyección de un colorante, filmando su comportamiento en el distribuidor y a través de la obtención de la curva de distribución de tiempos de residencia derivada del monitoreo de la conductividad del trazador inyectado a la corriente de entrada. Las curvas de Distribución de Tiempos de Residencia obtenidas para cada salida del distribuidor, para el distribuidor con una capacidad de 40 toneladas, pueden ser observadas en la figura 4.22.

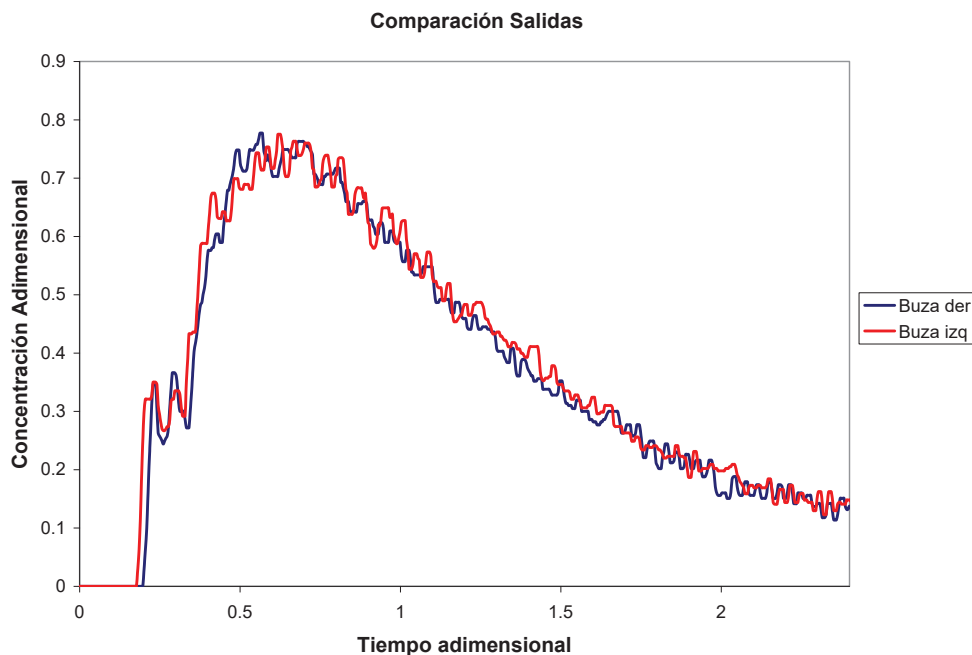


Figura 4.22 Comparación de las curvas de Distribución de Tiempos de Residencia obtenidas físicamente para las dos salidas.

Los experimentos para cada una de las salidas se realizaron por triplicado presentándose los resultados promedio de la caracterización del flujo para cada una de las salidas en la Tabla 4.III.

Tabla 4.III. Caracterización de flujo de fluidos obtenida de la simulación física.

	Volumen Pistón	Volumen Mezclado	Volumen Muerto
Salida Derecha	34.7 %	46.5 %	18.8 %
Salida Izquierda	37.7%	42.5%	19.8%

Las diferencias existentes en las fracciones de flujo entre las dos salidas se deben a que el comportamiento real del fluido a lo largo del distribuidor no es simétrico, esto debido a la naturaleza misma de la turbulencia.

4.3.1 Visualización del Flujo.

El comportamiento del fluido en el distribuidor, como se mencionó anteriormente, puede ser analizado inyectando un colorante en la corriente de entrada y filmando su difusión a través del distribuidor. Mediante esta técnica se puede validar lo observado en el modelo matemático respecto al

comportamiento de la zona de la entrada en el cual el fluido al chocar con el fondo del distribuidor tiende a subir a través de las paredes de forma contenida, figura 4.23, además de observar el comportamiento no simétrico del fluido que provoca las diferencias en las fracciones de flujo entre las dos salidas, figura 4.24. Por último se puede validar la existencia del fenómeno del circuito corto simulado matemáticamente, figura 4.25.

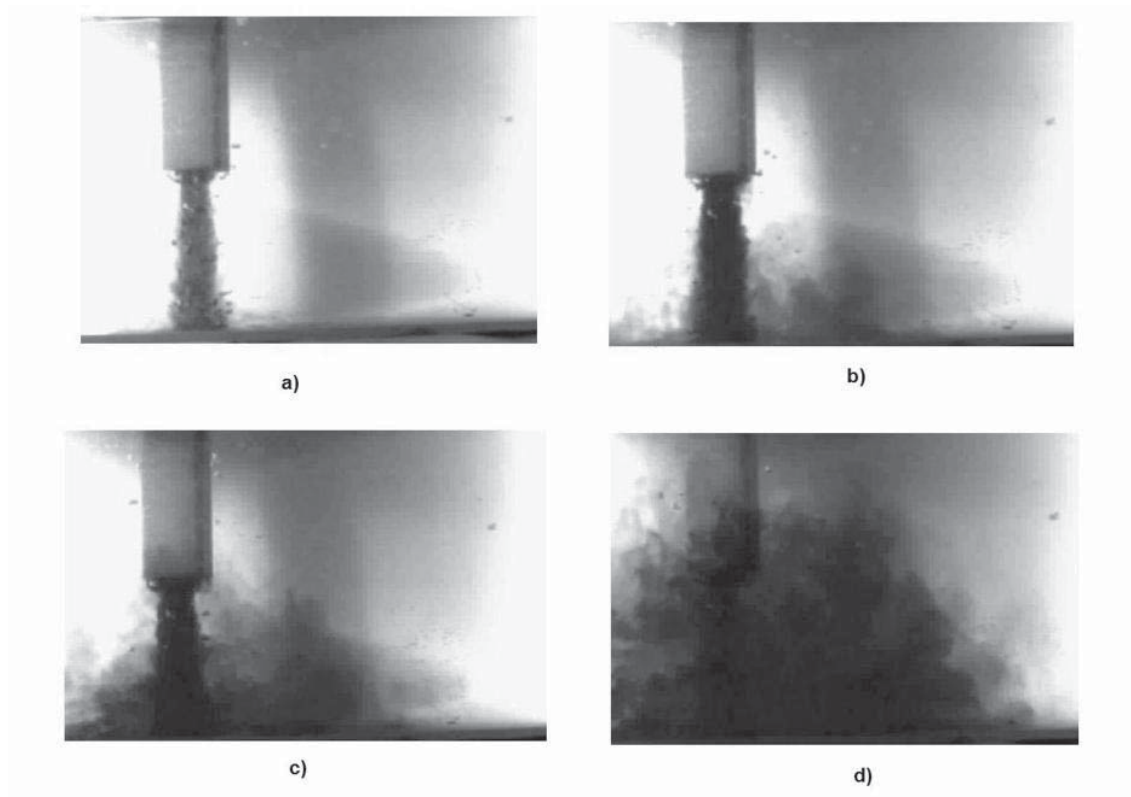


Figura 4.23. Impacto contenido del fluido con el fondo del distribuidor.

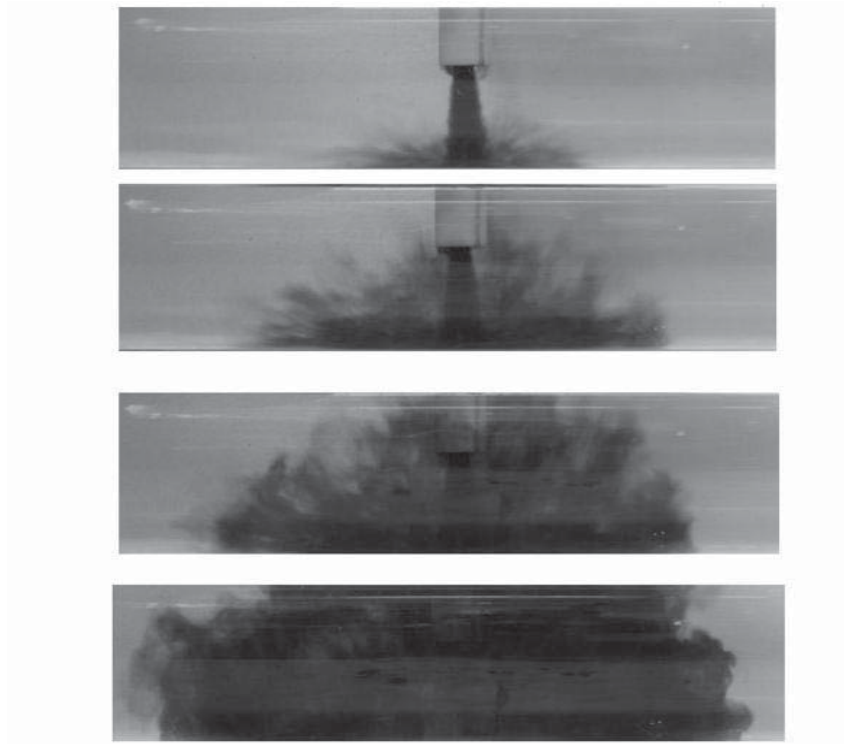


Figura 4.24 Comportamiento no simétrico del fluido en el distribuidor.

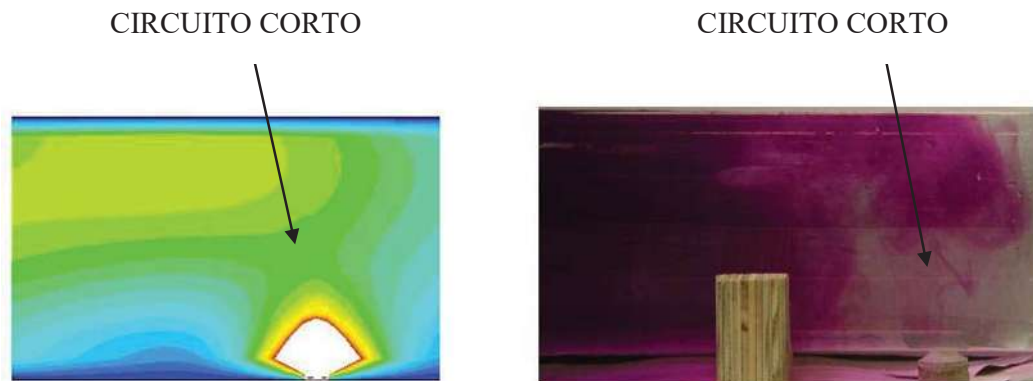


Figura 4.25. Fenómeno de circuito corto modelado matemática y físicamente.

4.4 Comparación Cuantitativa con el Modelo Matemático.

La comparación de los resultados de la modelación matemática y física son de vital importancia, ya que de esta forma se valida la aplicación del modelo de turbulencia utilizado en la simulación matemática. Las curvas de distribución de tiempos de residencia, que se pueden observar en la figura 4.26, muestran un comportamiento similar y por lo tanto las fracciones de

volumen no presentan diferencias significativas como se puede observar en la Tabla 4.IV.

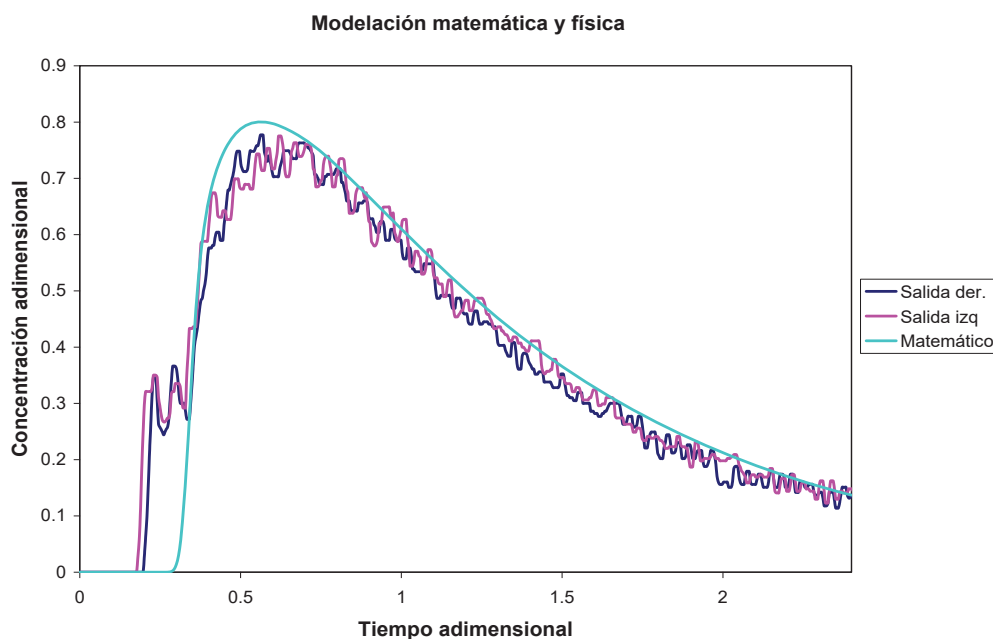


Figura 4.26. Comparación de las curvas de Distribución de Tiempos de Residencia obtenidas matemática y físicamente.

Tabla 4.IV. Comparación de las fracciones de volumen obtenidas física y matemáticamente.

	Modelo Físico	Modelo Matemático	% Error
% Volumen Pistón	36.2	39.5	8.3%
% Volumen Mezclado	44.5	42.4	4.9%
% Volumen Muerto	19.3	18.1	6.6%

El principal parámetro comparable es la fracción de volumen muerto, la cual para el modelo físico presenta una diferencia menor al 10% con la fracción obtenida en el modelo matemático, considerándose este factor como aceptable para las mediciones experimentales. Prácticamente las otras fracciones de flujo se comportan de igual manera.

4.5 Reducción Longitudinal del Distribuidor

Debido al alto volumen muerto presente en el sistema y a que prácticamente es la misma fracción que se reporta para el distribuidor tipo recto, lo cual no representa una mejora significativa, se propuso reducir longitudinalmente el modelo tal y como se muestra en la figura 4.27.

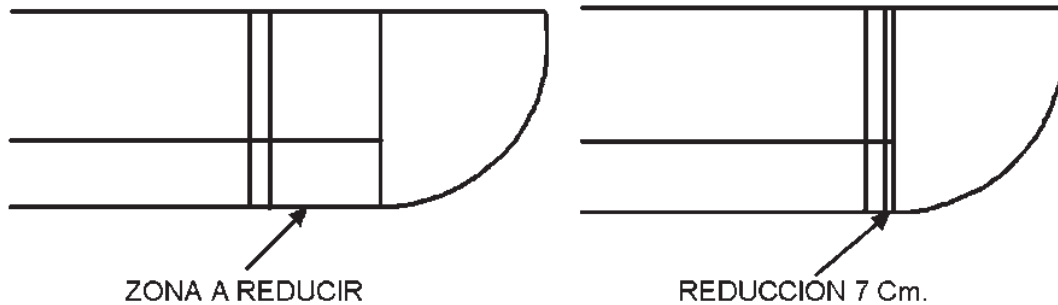


Figura 4.27 Reducción longitudinal del distribuidor.

La elección de reducir en esta zona el distribuidor se debió, entre otras cosas, a que de acuerdo a la distribución de velocidades obtenida de la modelación matemática se pudo constatar que en la zona del casquete semiesférico se tiene la gran parte del volumen muerto presente en el sistema. Al reducir esta parte del modelo provocaría que en la zona de los casquetes semi-esféricos se induzca una mayor dinámica ya que el fluido llegaría con mayor cantidad de energía a esa zona y por consiguiente se disminuiría el volumen muerto presente. Lo anterior se puede apreciar en las figuras 4.28 y 4.29. Es importante mencionar que la reducción del distribuidor de la buza de salida hacia la de entrada no es factible, ya que esta distancia está prácticamente *fija*, sin importar el diseño del distribuidor, por la ubicación de los moldes de colada.

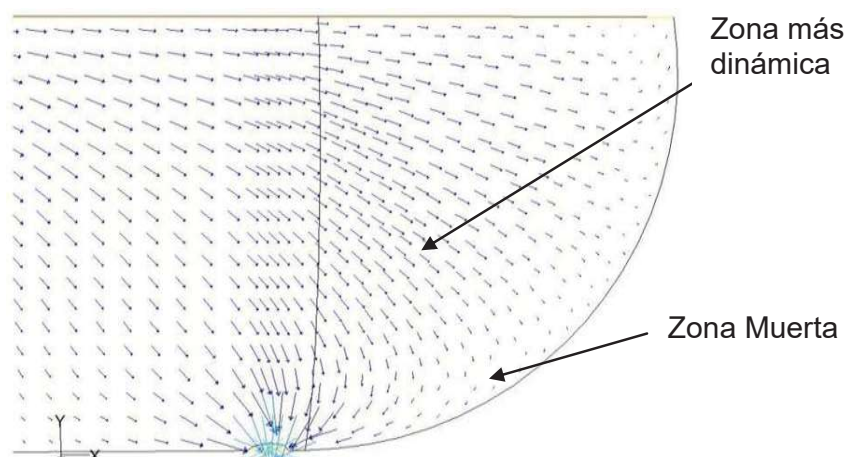


Figura 4.28. Vectores de velocidad en el casquete semiesférico para el distribuidor reducido.

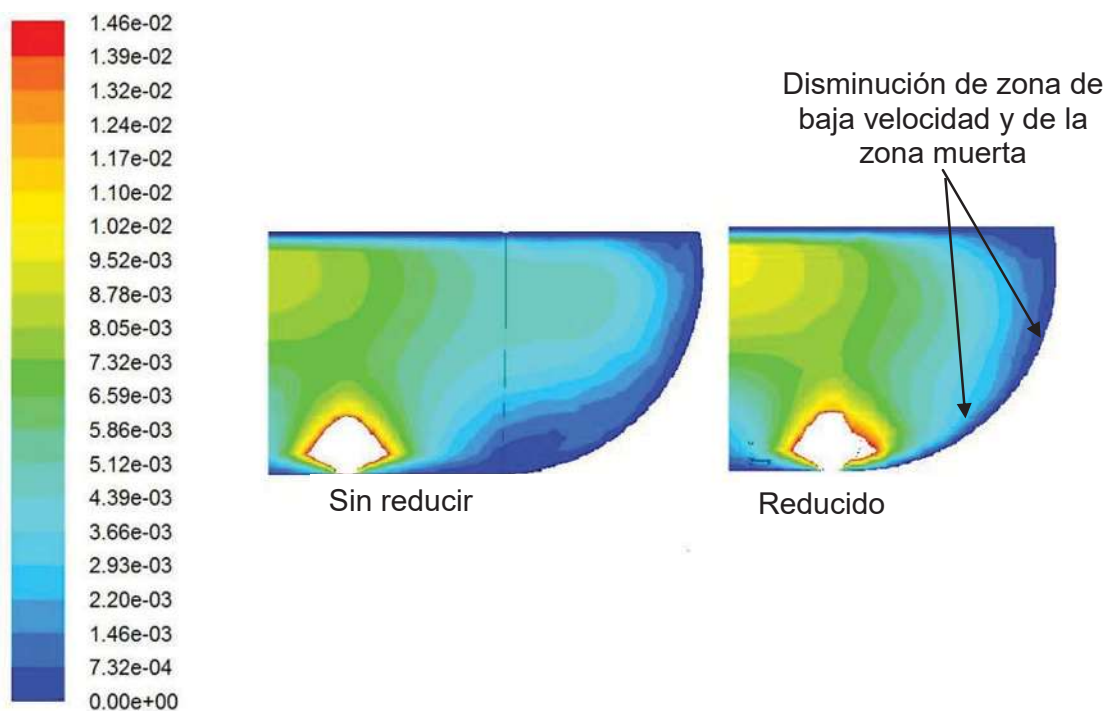


Figura 4.29. Comparación de los contornos de velocidad del distribuidor reducido y sin reducir longitudinalmente.

La fracción de volumen muerto producto de la reducción del distribuidor se redujo en un 11% aproximadamente respecto al valor en el distribuidor sin reducción. Los valores de las fracciones de flujo se presentan en la tabla 4.V.

Tabla 4.V. Caracterización del flujo de fluidos para el distribuidor reducido longitudinalmente.

	Volumen Pistón	Volumen Mezclado	Volumen Muerto
Mod. Matemático	37.5%	46.4%	16.1%

4.6 Comparación con el Distribuidor Tipo Recto.

La comparación con el distribuidor tipo recto se centra en dos aspectos principalmente, los cuales son la influencia de la geometría en la estabilidad de la zona de entrada y la caracterización del flujo de fluidos.

La estabilidad de la zona de entrada juega un rol muy importante en el diseño de un distribuidor ya que de ello depende la disminución del desgaste del refractario y evitar la apertura de la capa de escoria debido a la alta turbulencia, contribuyendo a obtener un acero más limpio y más homogéneo, tanto en composición como en temperatura. En la figuras 4.30 y 4.31 se puede apreciar la diferencia del impacto del chorro de entrada en el distribuidor tipo recto ^[6] y el propuesto, con el fondo y las paredes laterales respectivamente.

En el distribuidor tipo recto tiene lugar un impacto violento con el fondo del distribuidor puesto que se trata de un fondo plano, este impacto provoca que el acero se esparza en todas direcciones. Lo anterior produce que el impacto del fluido con las paredes laterales del distribuidor tipo recto sea muy fuerte también. En cambio en el distribuidor propuesto el impacto del chorro de entrada se da de manera moderada debido a la forma geométrica cilíndrica del distribuidor. Esto también favorece a que el fluido ascienda de forma gradual por las paredes laterales reduciéndose el impacto con éstas. La disminución de la velocidad con la cual el acero impacta las paredes del distribuidor reduce el desgaste de la capa de refractario y por lo tanto reduce la producción de inclusiones, ayudando a obtener un acero más limpio.

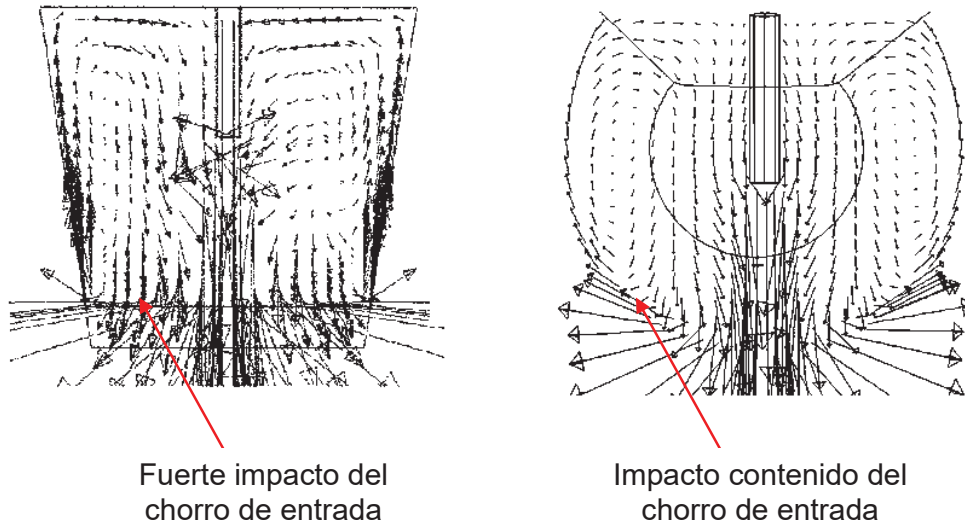


Figura 4.30. Comparación del impacto del chorro de entrada con el fondo en el distribuidor tipo recto (derecha)^[6] y el distribuidor propuesto (izquierda).

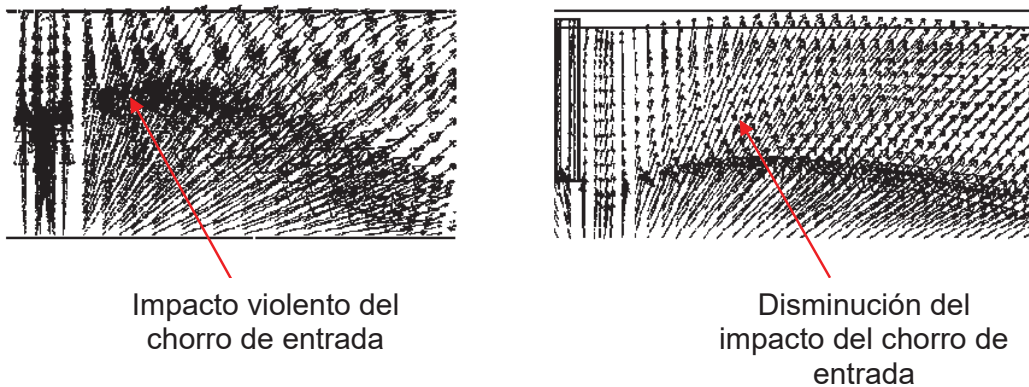


Figura 4.31. Comparación del impacto en las paredes laterales del distribuidor tipo recto (derecha)^[6] y el distribuidor propuesto (izquierda).

4.6.1 Comparación Cuantitativa.

La fracción de volumen muerto es el parámetro más crítico de la caracterización del flujo de fluidos y por ende es el principal indicativo de la eficiencia del sistema. En la tabla 4.VI se presenta la comparación de las fracciones de flujo obtenidas matemáticamente entre los dos diseños de distribuidores, el tipo recto estudiado por Barreto y colaboradores,^[6] y el propuesto en este trabajo de investigación.

Tabla 4.VI. Comparación de las fracciones de flujo entre los dos diseños de distribuidor.

Tipo de distribuidor	% Volumen Muerto	% Volumen Pistón	%Volumen mezclado	V_{pv}/V_{mv}
Recto ^[6]	18.8	20.1	61	0.33
Propuesto	18.1	39.5	42.4	0.93
Propuesto reducido. Longitudinalmente	16.1	37.5	46.4	0.81
Recto con Inhibidor de turbulencia. ^[6]	11.1	35.60	53.10	0.67

En base a esta tabla se puede observar que la fracción de volumen muerto entre el distribuidor tipo recto y el propuesto sin reducción, ambos con una capacidad de 40 toneladas, es prácticamente la misma, variando en un 3.7%. Este fue el principal motivo para reducir el distribuidor y buscar una fracción de volumen muerto más baja. Sin embargo con la reducción del distribuidor propuesto esta fracción disminuye únicamente un 15% respecto a la que tiene el distribuidor tipo recto.

Otro aspecto fundamental es que en la configuración del distribuidor propuesto *no se hace uso de un inhibidor de turbulencia*, debido a que la forma cilíndrica del fondo del distribuidor realiza esta función, por lo que comparando el distribuidor propuesto con el tipo recto con este modificador de flujo se puede observar que la fracción de volumen muerto es 31% más alta lo cual representa una diferencia muy significativa, además de que esto reduciría notablemente los costos de mantenimiento y se reduce la posibilidades de introducción o generación de inclusiones. Ahora bien se podría introducir un inhibidor de turbulencia y se mejorarían aun más el desempeño de este nuevo diseño de distribuidor, pero esto ya sería tema de otro trabajo de investigación.

En contraparte un parámetro sumamente favorable del distribuidor propuesto es la alta relación existente entre las fracciones de flujo pistón y mezclado, respecto a la relación existente en el distribuidor tipo recto. Este parámetro es un claro indicativo de lo estable que es la zona de la entrada en el distribuidor y muy importante en lo que a la eficiencia en la remoción de inclusiones.

CAPITULO V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y ORIGINALIDAD DEL TRABAJO

CONCLUSIONES

1. La forma geométrica cóncava del fondo del distribuidor disminuye la turbulencia en la zona de descarga del acero, al reducir la magnitud del impacto del chorro de entrada con las paredes del distribuidor. Lo anterior provoca que el fluido ascienda a través de las paredes de forma contenida, ayudando a disminuir la erosión del refractario en dicha zona, además de hacerla más estable lo que evitaría la apertura de la capa de escoria.
2. Los extremos semiesféricos del distribuidor son zonas en las que el fluido exhibe velocidades muy bajas, por lo cual son regiones donde se tiene gran parte del volumen muerto presente en el sistema. Sin embargo en el distribuidor modificado en tamaño este fenómeno se reduce por lo que con un diseño mejorado del distribuidor se podría aprovechar mejor el efecto benéfico de las paredes semiesféricas, ya que una de las bondades que presenta este diseño es que disminuye el impacto con las paredes laterales del distribuidor lo que podría eliminar el fenómeno de vorticidad. Con esto se podría entonces pensar en aumentar la capacidad del distribuidor, es decir, aumentar el tonelaje de acero a colar.
3. La fracción del volumen muerto en el distribuidor propuesto (sin reducción) prácticamente es la misma que la reportada para el distribuidor tipo recto. Sin embargo, al reducir longitudinalmente el distribuidor, también se reduce la fracción de volumen muerto en

aproximadamente 15%. En cambio, la fracción del volumen pistón es mayor respecto al distribuidor tipo recto lo cual es claro indicativo del efecto inhibitorio de la forma cóncava del fondo del distribuidor.

4. El aumentar la capacidad del distribuidor no implica una mayor productividad del sistema, ya que este aumento también trae consigo un incremento en la fracción de volumen muerto. Sin embargo con la introducción en el distribuidor de un “modificador de turbulencia”, se redirigiría el flujo hacia los extremos, provocando una mayor dinámica en esta zona y de esta manera disminuir el porcentaje de volumen muerto. Esto da para otro trabajo de investigación.
5. Los patrones de flujo así como la caracterización del flujo de fluidos obtenidos de la simulación matemática, concuerdan aceptablemente con los obtenidos físicamente a través de la obtención de imágenes y de las curvas de distribución de tiempos de residencia. Lo anterior valida la aplicación del modelo $k-\varepsilon$ estándar y demás condiciones en la simulación del flujo de fluidos en el distribuidor de colada propuesto.
6. La adaptación de los anillos de grafito en las buzas de salida constituye una opción económica y eficaz para el monitoreo no invasivo de la conductividad del trazador en el sistema. Así mismo el uso de sistemas de conversión de señales de analógico a digital y la programación gráfica, Labview[®], son una excelente alternativa para el procesamiento e interpretación de los datos, con la finalidad de caracterizar el flujo. En caso de existir cambios en las condiciones experimentales, por ejemplo en la capacidad del distribuidor o en la velocidad del chorro de entrada, no implica complicación alguna en la modificación de estas condiciones en la programación y así obtener de una manera rápida y sencilla la caracterización del flujo de fluidos del sistema.
7. La utilización de un mallado no estructurado en la zona de los casquetes semiesféricos origina la aparición de flujos asimétricos en dicha zona. La modelación de una sección del mismo, de solo un

cuarto del modelo es una excelente opción para sortear este problema.

8. La implementación de cortes geométricos sobre el sistema, reduce la deformación de las celdas y coadyuva a la obtención de mejores resultados.

RECOMENDACIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación del sistema propuesto, es conveniente rediseñar el distribuidor, en especial los casquetes semiesféricos, reduciendo su profundidad, como se puede observar en la figura 5.1. Dicha investigación requiere especial atención en la distancia que se le de como profundidad a la parte semiesférica, por lo que se sugiere la realización de varias simulaciones variando este parámetro en particular.

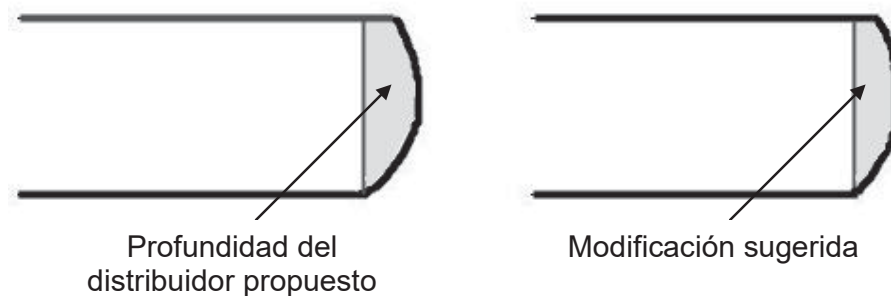


Figura 5.1 Distribuidor modificado para futuras investigaciones.

- Se recomienda el modelado del sistema sugerido en estado isotérmico, y de acuerdo a los resultados obtenidos y si el tiempo lo permite se sugiere la modelación en estado anisotérmico y con la inclusión de modificadores de turbulencia y sistemas controladores de flujo como las represas, por ejemplo. Además de estudiar a fondo el efecto de la vorticidad y flotación de inclusiones.
- Se recomienda el uso de computadoras de alto desempeño como las denominadas “workstation”, de dos y/o cuatro núcleos y de

preferencia de 64 bits, para la fase del modelado matemático ya que muchas de las simulaciones pueden llegar a tardar muchas horas de tiempo de CPU.

- En lo que respecta al equipo experimental con el que se cuenta se podrían hacer algunas mejoras, como por ejemplo, instrumentar más y de una manera más conveniente tanto el modelo físico como equipos periféricos. Se debe de tener una toma independiente de agua ya que de la manera en que se opera actualmente se tienen fluctuaciones serias en el control del nivel del distribuidor y si no se controla bien este parámetro se tienen resultados muy diferentes a lo largo de una jornada de trabajo experimental.

ORIGINALIDAD DEL TRABAJO

Un aspecto sumamente importante de este trabajo es que se trata de una propuesta totalmente innovadora de la geometría de un distribuidor de colada continua. Dicha geometría consiste de un cuerpo cilíndrico con los extremos semiesféricos sin el uso de ningún dispositivo modificador de flujo. Este tipo de geometría a pesar de que es muy compleja de simular tanto matemática como físicamente vale la pena llevarla a la práctica ya que los beneficios acarreados son mayores y se mejoraría sustancialmente la operación de colada.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1]. [http:// www. canacero.org.mx](http://www.canacero.org.mx).
- [2]. Irving. W.R. "Continuous Casting of Steel", Editorial Cambridge, (1993), pp. 1-38.
- [3]. [http:// ccc. Illinois. edu](http://ccc.illinois.edu).
- [4]. Sahai Y. y Emi T. "Tundish Technology for Clean Steel Production", Editorial World Scientific, (2008).
- [5]. Mazumdar D. y Guthrie R. "The Physical and Mathematical Modelling of Continuous Casting Tundish Systems." ISIJ International, Vol. 39 (1999), No. 6, pp. 524-567.
- [6]. Lopez-Ramirez S., Barreto J. de J., Palafox-Ramos J., Morales R.D. y Zacharias D. "Modeling Study of the Study of Turbulence Inhibitors on the Molten Steel Flow, Tracer Dispersion and Inclusion Trajectories in Tundishes". Metallurgical and Materials Transactions B Volume 32b, August 2001.
- [7]. Barrera G. y Barreto J. de J. "Análisis del desempeño Hidrodinámico Anisotérmico del Distribuidor de la Máquina de Colada Continua del acero.". Revista IDEAS, UAEM, (1997) pp. 2-7.
- [8]. Liangcai Z., Baokuang L., Yingxiong Z., Rengui W., Wenzhong W. y Xiaojun Z.. "Fluid Flow in a Four-strand Bloom Continuous Casting Tundish with Different Flow Modifiers". ISIJ International, Vol. 47 (2007), No. 1, pp. 88–94
- [9]. Jha P K., Dash K. S. y Kumar S. "Fluid Flow and Mixing in a Six Strand Billet Caster Tundish: A parametric Study" ISIJ International, Vol. 41 (2001), No. 12, pp. 1437–1446.
- [10]. Heaslip L. J., McLean A. y Summerville I.D. "Fluid Flow" – Review, Continuous Casting Vol. I, Chapter two, ISS-AIME (1983) pp 67-83.
- [11]. Levenspiel Octave. "Ingeniería de las Reacciones Químicas" Editorial Reverte (2002) pp. 277-309.

- [12]. Sahai Y. y Damley. C. "The Effect of Tracer Density on Melt Flow Characterization Casting Tundishes- A modeling Study." ISIJ International, Vol. 35 (1995). No. 2, pp. 163- 169
- [13]. Dueñas J. "Comportamiento Térmico del Acero Líquido Durante la inyección de Argón en el Distribuidor de la Máquina de Colada Continua". Tesis de Maestría, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, (2007). pp. 6-24.
- [14]. Sahai Y. y Emi. T. "Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes". ISIJ International. Vol. 36 (1996), No. 6, pp. 667-672
- [15]. Orozco. G.C. "Simulación Física Anisotérmica de un reactor de Flujo Continuo de Colada de Acero". Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, (1999).
- [16]. Tripathi A. y Ajmani. S. K. "Numerical Investigation of Fluid Flow Phenomenon in a Curved in a Curved Shape Tundish of Billet Caster" ISIJ International, Vol. 45 (2005), No. 11, pp. 1616–1625.
- [17]. Ilegbusi O. Iguchi M. y Wahnsiedler W. "Mathematical and Physical Modelling of Materials Processing Operations" Ed. Chapman & Hall (2000) pp. 2-26.
- [18]. Anderson. D.A. Tanenhill. J. y C. Pletcher R.H. "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer" Editorial Taylor & Francis (1997). pp. 249-278, 314-322.
- [19]. Bird. R.B. Stewart W.E. y Lightfoot E.N. "Fenómenos de Transporte" Editorial Reverté (2002) pp. 3.1-3.15, 5.1-5.9.
- [20]. Geiger G.H. y Poirier D.R. "Transport Phenomena in Metallurgy" Editorial Addison-Wesley (1973) pp. 36-65.
- [21]. Cebeci T., Shao J. P., Kafyeke F. y Laurendau E. "Computational Fluid Dynamics for Engineers" Editorial Springer (2005) pp. 81-90.
- [22]. Fluent 6.1 Documentation, User Guide Chapter 7th "Boundary Conditions", Chapter 10th "Modeling Turbulence" and Chapter 24th "Using the Solver".

- [23]. Kumar A., Mazumdar D. y Koria. S. "An Assessment of Fluid Flow Modeling and Residence Time Distribution Phenomena in Steelmaking Tundish Systems" *ISIJ International*, Vol. 44 (2004), No. 8, pp.1334–1341.
- [24]. Kumar A., Mazumdar D. y Koria. S. "Experimental Validation of Flow and Tracer Dispersion Models in a Four Strand Billet Caster Tundish." *Metallurgical and Materials Transactions B Volume 36b*, December (2005) pp. 777 – 785.
- [25]. Hou Q. y Zou. Z. "Comparison between Standard and Renormalization Group $k-\epsilon$ Models in Numerical Simulation of Swirling Flow Tundish." *ISIJ International*, Vol. 45 (2005), No. 3, pp. 325–330.
- [26]. Potter M.C., Wiggery D.C., Hondzo M. y Shih T.I. "Mecánica de Fluidos" Editorial Cengage Learning Editores (2002) pp. 665-700.
- [27]. Date A.W. "Solution of Transport Equations on Unstructured Meshes with cell-centered collocated variables. Part I: Discretization." *IJHMT*, Vol 48, (2005), pp. 1117-127.
- [28]. Deister F., Tremel U., Hassan O. y Weatherill N. "Fully Automatic and Fast Mesh Size Specification for Unstructured Mesh Generation". *Engineering with Computers*, (2004) pp. 237-248.
- [29]. Foust. A.S. Wenzel L.A. Clump C.W. Maus L. y Andersen L.B. "Principios de Operaciones Unitarias" Editorial CECSA (1972) pp. 180-183.
- [30]. García S. "Modelación Matemática de la Formación de Vórtices durante la Operación en el Distribuidor de Colada Continua" Tesis de Maestría. Tecnológico de Morelia. (2007).
- [31]. Tarifa E. "Teoría de Modelos y Simulación, Introducción a la Simulación". *Notas del Curso*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.
- [32]. Xing T. y Stern F. "Introduction to Computational Fluid Dynamics". *Intermediate Mechanics of Fluids*, the University of Iowa. (2006). PPT.
- [33]. Ahn. T.S., Lee K.J y Park H. S. "Tundish Shape Design using Numerical Approximate Solution". *Numerical Analysis and Applied Mathematics, International Conference*. (2007) pp. 41-44.

- [34]. Vayrinen P., Valaphati S., Louhenkilpi S., Chatburn L., Clark M. y Wagner P. "Tundish Flow Model Tuning and Validation, Steady State and Transient Casting Situations". SteelSim (2007) pp. 147-152.
- [35]. Pardhesi R., Basak S., Sing A.K. Basu S. Mahassabde V, Roy S.K. y Kumar S. "Mathematical Modeling of the Tundish of a Single Strand Slab Caster". ISIJ International, Vol. 44 (2004), No. 9 pp. 1534 - 1540.
- [36]. Craig. K.J., de Kock J., Makgata K.W. y Wet G.J. "Design Optimization of a Single-strand Continuous Caster Tundish using Residence Time Distribution Data". ISIJ International, Vol. 41 (2001), No. 10 pp. 1194 - 1200.
- [37]. Zhang L., Taniguchi S. y Cai K. "Fluid Flow and Inclusion Removal in Continuous Casting Tundish" Metallurgical and Material Transactions B, Vol. 31 (2000) pp. 253-266.
- [38]. Koria S. y Singh S. "Physical Modeling of the Effects on the Flow Modifier on the Dynamics of Molten Steel Flowing in a Tundish". ISIJ International, Vol. 37 (1994), No. 10 pp. 784-793.
- [39]. Tanaka H., Nishihara R., Kitagawa I. y Tsujino R. "Quantitative Analysis of Contamination of Molten Steel in Tundish". ISIJ International, Vol. 33 (1993), No. 12 pp. 1238-1243.
- [40]. Sahai Y. y Emi T. "Criteria for Water Modeling of Melt Flow and Inclusion Removal in Continuous Casting Tundishes" ISIJ International, Vol. 36 (1996), No. 9 pp. 1166-1173.
- [41]. Cho M.J. y Kim I. C. "Simple Tundish Mixing Model of Continuous Casting During a Grade Transition". ISIJ International, Vol. 46 (2006), No. 10 pp. 1416-1420.
- [42]. Hoffman J. y Johnson C. "Computability and Adaptivity in CFD". Encyclopedia of Computational Mechanics, Editorial John Wiley & Sons, (2004). Pp. 1-30.
- [43]. Brimacombe J.K. "The Challenge of Quality of Continuous Casting Processes". Metallurgical and Material Transactions B, Vol. 30B (1999) pp. 553-566.

- [44]. Guthrie R. "Fluid Flows in Metallurgy- Friend or Foe? ". Metallurgical and Material Transactions B, Vol. 35B (2004) pp. 417-437.
- [45]. Mclean A. "The Science of Technology of Steelmaking- Measurements, Models and Manufacturing". Metallurgical and Material Transactions B, Vol. 37B (2006) pp. 319-332.
- [46]. Ferziger J.H. y Peric M. "Computational Methods for Fluid Dynamics". Editorial Springer (2002).
- [47]. Papanastasiou T.C., Georgiou C. G. y Alexandrou A. N. "Viscous Fluid Flow". Editorial CRC Press (1999).
- [48]. Chunj T.J. "Computational Fluid Dynamics" Editorial Cambridge University Press (2002).
- [49]. [http:// www. steeluniversity.org](http://www.steeluniversity.org)

ANEXO A

CONCEPTOS DE LAS CONDICIONES DE SIMULACION

A.1 Criterio de Convergencia.

Cuando se utilizan métodos iterativos de solución, es importante conocer cuando detener el cálculo. El procedimiento más común está basado en la diferencia entre dos iteraciones sucesivas. Esta diferencia comúnmente se conoce como residual. El procedimiento iterativo se detiene cuando esta diferencia es menor que un valor predeterminado. En Fluent® este cálculo está basado en la aplicación de la ecuación de conservación de una cierta variable (Ecuación A.1), por ejemplo la velocidad, a una celda determinada llamada p , como la que se muestra en la figura A.1.

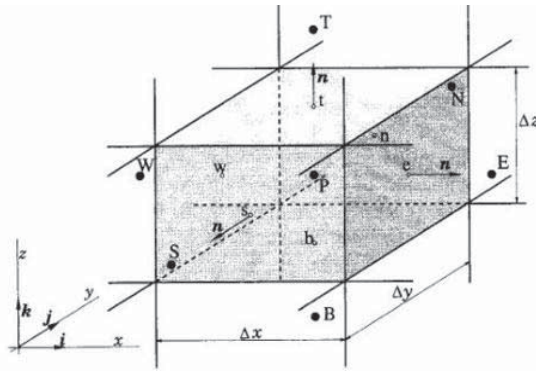


Figura A.1. Celda hexaédrica.

$$a_p v_p = \sum_{nb} a_{nb} v_{nb} + b \quad (A.1)$$

En la ecuación anterior b toma en cuenta las condiciones frontera y otros términos como la gravedad. El residual, R , que se calcula en el método de segregación es el imbalance de la ecuación anterior sumado sobre todas las celdas computacionales. Este residual es denominado como “residual no escalado”.

$$R = \sum_{\text{celdas } p} \left| \sum_{nb} a_{nb} v_{nb} + b - a_p v_p \right| \quad (A.2)$$

En general es difícil el juzgar la convergencia por medio de la ecuación anterior, debido a que un residual no escalado de 0.01 puede ser relativamente pequeño si el valor promedio de la variable en el dominio es de 5000 pero puede ser relativamente grande si el valor promedio es de 0.1. El escalamiento asegura que el residual sea una medida relativa más que absoluta de la variable. La ecuación para el residual escalado es la siguiente:

$$R = \frac{\sum_{\text{celdas } P} \left| \sum_{nb} a_{nb} v_{nb} + b - a_P v_P \right|}{\sum_{\text{celdas } P} |a_P v_P|} \quad (\text{A.3})$$

Fluent calcula los residuales para cada una de las ecuaciones presentes en el sistema.

A.2 Algoritmo SIMPLE

El cálculo del flujo de fluidos se logra resolviendo secuencialmente las ecuaciones de continuidad y movimiento, teniendo una especial dificultad el cálculo de la presión debido a que no existe una ecuación independiente para esta variable. Las ecuaciones de momento se utilizan para determinar sus respectivas componentes de velocidad, lo cual deja a la ecuación de continuidad, la cual no contiene a la presión, para determinar la presión. ^[24,42]

Partiendo de la ecuación de continuidad discretizada,

$$\sum_f^{N_{\text{caras}}} J_f A_f = 0 \quad (\text{A.4})$$

Donde J_f es el flujo másico (ρv) a través de la cara f del volumen de control y A_f es el área de esa misma cara. Como se mencionó la presión no aparece en la ecuación de continuidad (A.1), la cual es para fluidos incompresibles, debido a que la densidad no está relacionada con la presión.

El algoritmo denominado SIMPLE (por sus siglas en ingles Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) es utilizado para introducir la presión en la ecuación de continuidad, obteniéndose una ecuación de la siguiente forma:^[24]

$$J_f = \hat{J}_f + d_f (P_{c0} - P_{c1}) \quad (A.5)$$

Donde P_{c0} y P_{c1} corresponden a la presión dentro de las dos celdas que conforman la cara, $\hat{J}_f$ contiene la influencia de las velocidades en dichas celdas y d_f es una función del promedio de los coeficientes de la ecuación linealizada de momento para las celdas que conforman la cara.

El algoritmo SIMPLE utiliza una relación entre la velocidad y la presión corregida para hacer cumplir la conservación de masa y así obtener el campo de presiones. El primer paso en la aplicación de este algoritmo es suponer el campo de presiones, P^* , calculándose el flujo másico resultante, J_f^* , por medio de la siguiente expresión derivada de la ecuación (2).

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f (P_{c0}^* - P_{c1}^*) \quad (A.6)$$

La ecuación anterior no satisface la ecuación de continuidad, por lo que se agrega un término, J_f' , para corregir el flujo, J_f^* , y así obtener el flujo corregido en la cara, J_f , que satisfaga la ecuación de continuidad.

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (A.7)$$

El algoritmo SIMPLE establece que el cálculo del flujo corregido sea por medio de la siguiente ecuación:

$$J_f' = d_f (P_{c0}' - P_{c1}') \quad (A.8)$$

Donde P' es el valor corregido de la presión en la celda.

El algoritmo SIMPLE sustituye las ecuaciones de flujo corregido (A.4 y A.5) en la ecuación discretizada de continuidad y de esta forma se obtiene la ecuación discretizada linealizada para la presión corregida en una celda p .

$$a_p P' = \sum_{nb} a_{nb} P_{nb}' + b \quad (A.9)$$

El subíndice nb se refiere a las celdas vecinas, a_p y a_{nb} son los coeficientes linealizados de la presión corregida. El número de celdas vecinas depende de la tipología de la malla. El término b es el flujo neto entrando a la celda, y está dado por la siguiente ecuación:

$$b = \sum_f^{N_{caras}} J_f^* A_f \quad (A.10)$$

Una vez obtenida la solución, la presión y el flujo son corregidos por medio de las siguientes expresiones:

$$P = P^* + \alpha_p P' \quad (A.11)$$

$$J_f = J_f^* + d_f (P_{c0}' - P_{cl}') \quad (A.12)$$

Donde α_p es el factor de relajación para la presión y cuyo valor más usual es 0.8.

A.3 Factores de Relajación.

Debido a la no linealidad del conjunto de ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos turbulento, es necesario controlar el cambio de la propiedad escalar (ϕ) de una iteración a otra. El cambio normal de la variable (ϕ) en muchas ocasiones causa que el sistema se desestabilice por lo que la mejor opción es que la variable cambie en solo una fracción del valor del cambio normal. El factor que hace que disminuya la proporción del cambio de la variable se denomina factor de relajación (α). Por lo que valor de la variable ϕ en la iteración n resulta de la siguiente ecuación:

$$\phi^n = \phi^{n-1} + \alpha_\phi (\phi^{new} - \phi^{n-1}) \quad (A.13)$$

Donde el término ϕ^{new} se obtiene a partir de la ecuación de conservación aplicada a un nodo p.

$$\phi_p^{new} = \frac{\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb}^n - b}{a_p} \quad (A.14)$$

ANEXO B

IMPORTANCIA DE LOS CORTES EN LA MALLA

Los cortes en la malla se refieren al seccionamiento de la geometría con el objetivo de tener una malla menos distorsionada que no influya en la solución del sistema de ecuaciones. La forma de las celdas afecta significativamente la solución numérica tanto en su precisión como en la convergencia. La existencia de celdas altamente deformadas desestabiliza la solución sobre todo en regiones de altos gradientes de velocidad, como lo es la zona de la entrada, la cual es una región turbulenta. Una medida de la deformación de una celda es el sesgo, que se define como la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente.

La figura B.1 muestra la vista lateral del distribuidor sin la implementación de cortes destinados a disminuir la distorsión de la malla. Únicamente se observan los cortes de las buzas, los cuales son necesarios porque sus volúmenes se empalman con el distribuidor. La figura B.2 muestra la malla sobre el plano transversal del distribuidor de colada sin los cortes geométricos apropiados, donde a pesar de tener un mallado estructurado las celdas que lo conforman están muy distorsionadas. En la figura B.3 se pueden los vectores de velocidad resultantes de la simulación del sistema los cuales muestran un comportamiento erróneo.

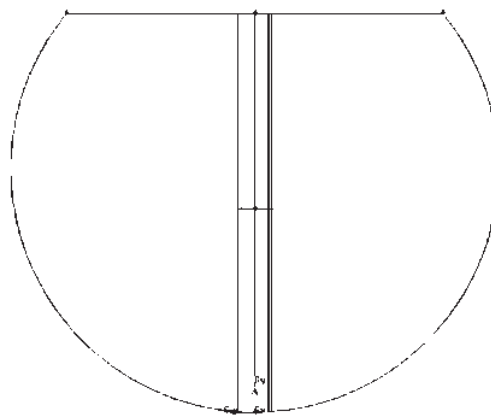


Figura B.1. Vista lateral del distribuidor sin cortes.

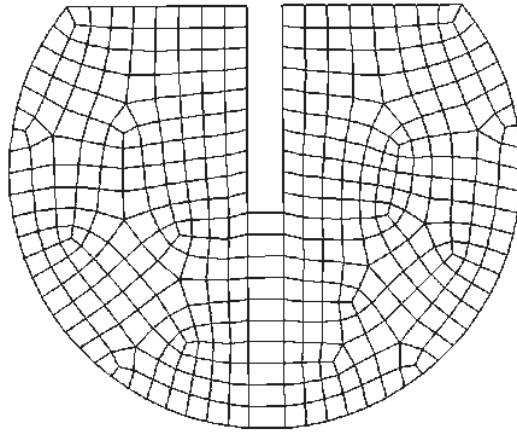


Figura B.2 Malla distorsionada.

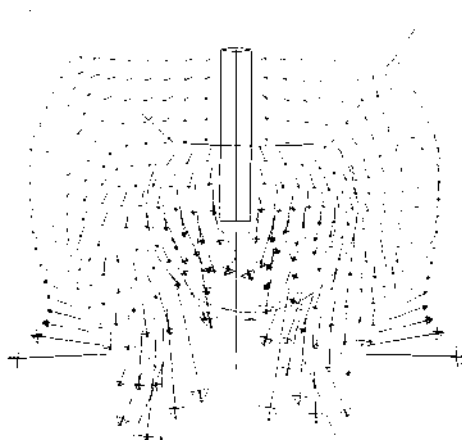


Figura B.3. Vectores de velocidad resultantes de la simulación del sistema sin cortes geométricos.

Al aplicar los cortes geométricos, mostrados en la figura B.4, las celdas que conforman la malla son mucho más definidas. A este tipo de mallas estructuradas se le conoce como mallas linealizadas, figura B.5. Al simular el sistema se obtienen vectores de velocidad, mostrados en la figura B.6, que describen un comportamiento mucho más lógico y preciso del fluido.

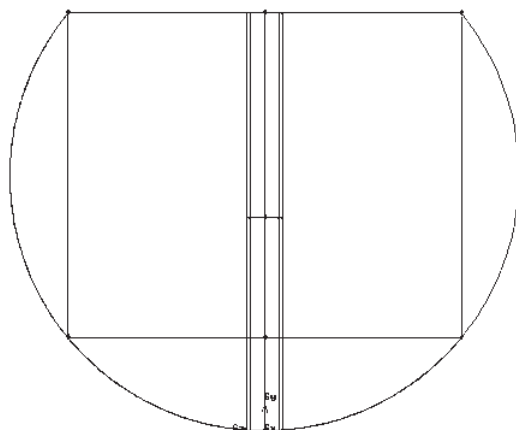


Figura B.4 Vista lateral del distribuidor con cortes geométricos.

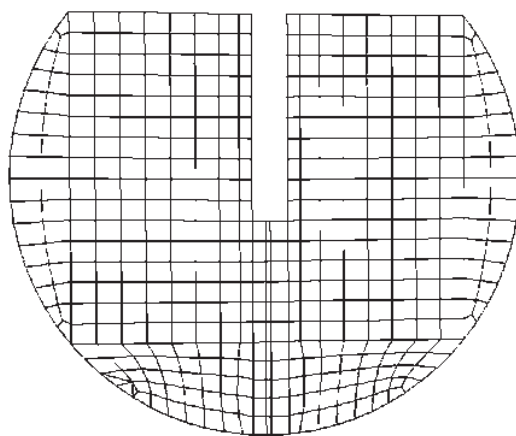


Figura B.5 Malla sin distorsión por la implementación de cortes.

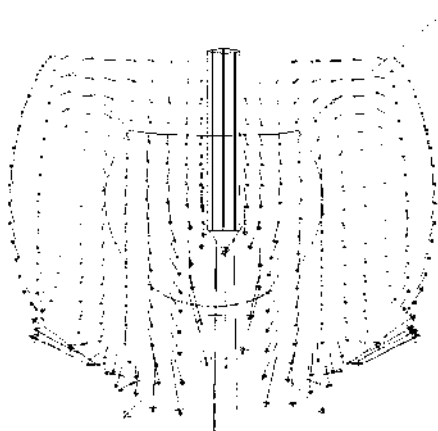


Figura B.6 Vectores de velocidad resultantes de simular el sistema con los cortes apropiados.

Implementar muchos cortes en una determinada geometría puede originar que el flujo de fluidos pierda continuidad, es decir que su flujo parezca restringido en ciertas áreas. Por esta razón, implementar cortes geométricos constituye una etapa de prueba y error en la modelación del sistema.

La dinámica de fluidos computacional es una herramienta muy poderosa para obtener soluciones de problemas de flujo de fluidos, sin embargo su mayor peligro radica en que siempre da una respuesta, que puede ser correcta, un poco sesgada o muy equivocada. La solución obtenida y la interpretación de ésta dependerán del conocimiento que tenga el usuario de la materia.