



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALÚRGICAS**



***“COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL ACERO LÍQUIDO DURANTE LA INYECCIÓN
DE ARGÓN EN EL DISTRIBUIDOR DE LA MÁQUINA DE COLADA CONTÍNUA”***

TÉSIS

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

PRESENTA

ING. JOSÉ MANUEL DUEÑAS GUZMÁN

ASESOR

DR. GERARDO BARRERA CARDIEL

CO-ASESOR

DR. JOSÉ DE JESÚS BARRETO SANDOVAL

MORELIA MICH., AGOSTO DE 2007

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

SR. JOSÉ JESÚS DUEÑAS MEJÍA
SRA. ANGELA CELIA GUZMÁN AMEZCUA

COMO UN PEQUEÑO RECONOCIMIENTO
A SU ESFUERZO, VISIÓN Y AMOR
ILIMITADO.

A MI ESPOSA E HIJA:

GLORIA Y LESLIE

POR SU AMOR, PACIENCIA,
CONSTANCIA Y GRAN CARIÑO.

J.M.D.G.

AGRADECIMIENTOS

- ☞ A mi Dios, por caminar a mi lado en todo momento.
- ☞ A mis hermanas Lety, Lucy, Marce y mi hermano José por hacerme notar mis errores como persona y brindarme siempre sus manos.
- ☞ De manera especial a mi hermana Rosy y su esposo Ringo, por darme en toda oportunidad sus brazos.
- ☞ A todo el personal académico del I.I.M. - U.M.S.N.H., en especial al Dr. Gerardo Barrera Cardiel por permitirme cumplir mi compromiso de superación y obsequiarme sus consejos y confianza, a pesar del tiempo.
- ☞ Al Dr. José de Jesús Barreto Sandoval del D.E.P.I. - I.T.M., por aceptarme como su alumno, brindándome el apoyo requerido en todos los aspectos, sin dejar de mencionar su valiosa amistad.
- ☞ A CONACYT, por su apoyo vía beca con registro N° 182349.
- ☞ Finalmente, a todos mis familiares, amigos y compañeros, muchas gracias por el apoyo que me han brindado.

CONTENIDO

	Página
Contenido	<i>iii</i>
Lista de tablas	<i>vii</i>
Lista de figuras	<i>viii</i>
Notación	<i>Xiii</i>
Objetivos	1
Justificación	1
Resumen	2
Capítulo 1	
Introducción	3
Capítulo 2	
Revisión bibliográfica	6
2.1.- Importancia del proceso de colada continua de acero	6
2.2.- Descripción del proceso de colada continua de acero	7
2.3.- El distribuidor de colada continua	9
2.3.1.- Tipos de distribuidores	9
2.3.2.- Dispositivos modificadores de flujo (DMF)	13
2.3.2.1.- Inhibidor de turbulencia	13
2.3.2.2.- Burbujeadores	13
2.3.3.- Características deseables de los refractarios	14
2.4.- Modelación física de los procesos metalúrgicos	14
2.4.1.- Definición	14
2.4.2.- Criterios de diseño	16
2.4.2.1.- Similitud geométrica	16
2.4.2.2.- Similitud dinámica y similitud cinemática	17
2.4.2.3.- Similitud térmica	17

2.5.- Números adimensionales	18
2.6.- Curvas de distribución de tiempo de residencia	20
2.6.1.- Curva C	21
2.6.2.- Curva F	22
2.7.- Tipos de flujo	23
2.7.1.- Flujo pistón o tapón	23
2.7.2.- Flujo mezclado o perfecto	23
2.7.3.- Flujo muerto	23
2.8.- Caracterización de burbujas	24
2.9.- Simulación matemática de los procesos metalúrgicos	25

Capítulo 3

Desarrollo experimental	27
3.1.- Diseño y construcción de los burbujeadores	27
3.1.1.- Primer prototipo “tapones de arena”	27
3.1.2.- Segundo prototipo usando lona sintética – acrílico	29
3.1.3.- Tercer prototipo usando lona sintética – acrílico	31
3.1.4.- Modelado matemático de los burbujeadores	33
3.1.5.- Diseño óptimo del burbujeador en acrílico – lona sintética	36
3.2.- Construcción a escala del modelo	38
3.2.1.- Modelo del distribuidor de colada continua	42
3.2.2.- Inhibidor de turbulencia	45
3.2.3.- Buzas de alimentación y descarga	46
3.3.- Cuantificación del volumen de agua equivalente al volumen de acero	47
3.4.- Estratificación térmica para el criterio de similitud	48
3.5.- Ubicación y ensamble de los suministros de agua caliente, fría y descargas	52
3.6.- Calibración de válvulas	55
3.7.- Ubicación de los burbujeadores en el fondo del distribuidor	56
3.8.- Ensamble y calibración de los medidores de aire	59
3.9.- Ensamble y ubicación de los sensores de temperatura	60
3.10.- Validación de los sensores de temperatura	62

3.11.- Escoria	62
3.12.- Acondicionamiento del sistema de adquisición de datos	63
3.12.1.- Tarjeta de adquisición de datos.	63
3.12.2.- LM35	64
3.12.3.- Fuente de poder	64
3.12.4.- Interfase para la adquisición de datos	65
3.12.5.- Acondicionamiento de datos	66
3.13.- Experimentos	68

Capítulo 4

Análisis y discusión de los resultados	70
4.1.- Burbujeador, segundo prototipo, usando lona sintética y acrílico	70
4.2.- Burbujeador, tercer prototipo, usando lona sintética y acrílico	71
4.3.- Modelado matemático de los burbujeadores	72
4.4.- Diseño óptimo de los burbujeadores	76
4.5.- Ubicación de los burbujeadores en el fondo del distribuidor	77
4.5.1.- Posición 1	79
4.5.2.- Posición 2	79
4.5.3.- Posición 3	80
4.5.4.- Posición 4	80
4.5.5.- Posición 5	81
4.5.6.- Posición 6	82
4.6.- Curvas F	84
4.7.- Curvas C y caracterización del flujo	96
4.8.- Simulación física contra simulación matemática	104

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones	108
5.1.- Conclusiones	118
5.2.- Recomendaciones	109

Referencias	110
Apéndice 1	
A1.1.- Caracterización del flujo	116
Apéndice 2	
A2.1.- Modelo $k - \varepsilon$ y modelo Euleriano	118

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 2.I, Comparación entre las propiedades físicas del acero y el agua	15
Tabla 3.I, Tamaño de la malla de la caja de viento	34
Tabla 3.II, Condiciones utilizadas en la convergencia de la caja de viento	36
Tabla 3.III, Dimensiones del modelo y prototipo	42
Tabla 3.IV, Dimensiones del Inhibidor de Turbulencia	45
Tabla 3.V, Propiedades físicas del acero	47
Tabla 3.VI, Tamaño de malla del distribuidor y ubicación de los burbujeadores	59
Tabla 3.VII, Ubicación de los sensores en baño de agua	62
Tabla 3.VIII, Experimentos realizados	69
Tabla 4.I, Detalles de los experimentos	84
Tabla 4.II, Detalles de los gráficos	85
Tabla 4.III, Temperatura registrada por los sensores	85
Tabla 4.IV, Pérdidas de temperatura	86
Tabla 4.V, Resumen de las proporciones de los diferentes tipos de flujo	95

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1, Máquina de Colada Continua de Bessemer	6
Figura 2.2, Nave de Colada Continua	8
Figura 2.3, Vista lateral del distribuidor tipo bote	10
Figura 2.4, Vista en planta del distribuidor tipo bote	11
Figura 2.5, Vista en planta del distribuidor tipo V	11
Figura 2.6, Vista en planta del distribuidor tipo C	11
Figura 2.7, Vista en planta del distribuidor tipo T	11
Figura 2.8, Vista en planta del distribuidor tipo delta	12
Figura 2.9, Vista en planta del distribuidor tipo H	12
Figura 2.10, Dispositivos modificadores de flujo	14
Figura 2.11, Criterios de similitud para un reactor agitado	16
Figura 2.12, Curva C	22
Figura 2.13, Curva F	22
Figura 2.14, Estancamientos	24
Figura 3.1, Redondo de Nylamid	28
Figura 3.2, Máquina de compactación	28
Figura 3.3, Tubo de acrílico y arena	28
Figura 3.4, Primeros ensayos en tubos de arena	28
Figura 3.5, Micrografías de la lona sintética	29
Figura 3.6, Vista en planta del burbujeador	29
Figura 3.7, Vista frontal del burbujeador	30
Figura 3.8, Vista lateral de la caja de viento	30
Figura 3.9, Vista frontal de la caja de viento	30
Figura 3.10, Vista en planta de la caja de viento	30
Figura 3.11a, Diversas vistas de la caja de viento	31
Figura 3.11b, Diversas vistas de la caja de viento	31
Figura 3.12, Caja de viento en acrílico	32
Figura 3.13, Burbujeador en operación	32
Figura 3.14 Pasos en el modelado matemático	33

Figura 3.15, Ambiente del programa Gambit® donde se incluye el burbujeador propuesto	34
Figura 3.16, Ambiente en Gambit® del distribuidor	35
Figura 3.17, Ambiente del programa Fluent®	35
Figura 3.18, Resultados que presenta Fluent®	36
Figura 3.19, Dimensiones de la caja de viento	37
Figura 3.20, Construcción en acrílico de las cajas de viento utilizadas	37
Figura 3.21, Vista en planta del medio poroso en el distribuidor	38
Figura 3.22a, Dimensiones del prototipo del distribuidor	38
Figura 3.22b, Dimensiones del prototipo del distribuidor	39
Figura 3.23, Distribuidor modelo en acrílico	44
Figura 3.24, Geometría del distribuidor modelo	44
Figura 3.25, Vista lateral del distribuidor modelo	44
Figura 3.26, Vista en planta del distribuidor modelo	44
Figura 3.27, Inhibidor construido en acrílico	45
Figura 3.28, Geometría del inhibidor	45
Figura 3.29, Vista en planta del inhibidor	45
Figura 3.30, Isométrico del inhibidor	45
Figura 3.31, Válvulas de alimentación	46
Figura 3.32, Válvula de descarga izquierda	47
Figura 3.33, Válvula de descarga derecha	47
Figura 3.34, Altura del fluido en el distribuidor	48
Figura 3.35, Coeficientes de expansión térmica de algunos materiales	52
Figura 3.36, De izquierda a derecha, contenedores de agua caliente y fría	53
Figura 3.37, Calentador de agua	53
Figura 3.38, Mueble en madera de pino	54
Figura 3.39, Equipo experimental	54
Figura 3.40, Recipiente metálico para el reciclaje del agua	55
Figura 3.41, Válvulas de alimentación al recipiente metálico	55
Figura 3.42, A1 y A2	56
Figura 3.43, B1 y B2	56
Figura 3.44, C1 y C2	57

Figura 3.45, D1 y D2	57
Figura 3.46, E1 y E2	57
Figura 3.47, F1 y F2	58
Figura 3.48, G1 y G2	58
Figura 3.49, H1 y H2	58
Figura 3.50, Vista de los medidores de flujo y compresor de aire	60
Figura 3.51, Ubicación de sensores en el baño de agua	60
Figura 3.52, Ubicación de los sensores en las descargas	61
Figura 3.53, Ubicación de sensores en AC	61
Figura 3.54, Vista lateral de la ubicación de sensores en el baño	61
Figura 3.55, Vista en planta de la ubicación de sensores en el baño	62
Figura 3.56, Capa de parafina líquida y orificio para su recuperación	63
Figura 3.57, Tarjeta de adquisición de datos	64
Figura 3.58, Vista inferior del LM35	64
Figura 3.59, Fuente de poder de corriente eléctrica	65
Figura 3.60, Tarjetas de adquisición de datos	65
Figura 3.61, Pantalla del programa para la fase de adquisición de las señales de los LM35	66
Figura 3.62, Estructura del programa	66
Figura 3.63, Pantalla del filtro	67
Figura 3.64, Estructura del programa	67
Figura 3.65, Sistema de adquisición de datos vista A	68
Figura 3.66, Sistema de adquisición de datos vista B	68
Figura 3.67, Conexiones de los LM35	68
Figura 4.1, Cámara de agua	70
Figura 4.2, Vista lateral de la cámara de agua	71
Figura 4.3, Porción de la cámara de agua	72
Figura 4.4, Comportamiento del tercer prototipo	73
Figura 4.5, Alargamiento del conducto de alimentación del tercer prototipo	73
Figura 4.6, Alargamiento del conducto de alimentación	73
Figura 4.7, Ensanchamiento del conducto de alimentación	73
Figura 4.8, Ensanchamiento y alargamiento del conducto de alimentación	74

Figura 4.9, Doble conducto de alimentación	74
Figura 4.10, Doble conducto de alimentación con baffles	74
Figura 4.11, Ensanchamiento del cuello de la caja de viento	74
Figura 4.12, Alargamiento de baffles	75
Figura 4.13, Cambio de ángulo de los baffles	75
Figura 4.14, Alargamiento de baffles	75
Figura 4.15, Ensanchamiento de la caja de viento	75
Figura 4.16, Caja de viento previa a la convergencia	76
Figura 4.17, Cambio de ubicación de los conductos de alimentación	76
Figura 4.18, Vista en 3D de la caja de viento	76
Figura 4.19, Vista de la caja de viento con medio poroso	77
Figura 4.20, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor, posición 1	79
Figura 4.21, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor, posición 2	79
Figura 4.22, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor, posición 3	80
Figura 4.23, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor, posición 4	80
Figura 4.24, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor, posición 5	81
Figura 4.25 Isolineas de velocidad (m/s) del distribuidor	81
Figura 4.26, Porcentaje de los contornos de turbulencia del distribuidor	82
Figura 4.27, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor, posición 6	82
Figura 4.28, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor	83
Figura 4.29, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor	83
Figura 4.30, Comparativo de todos los sensores de temperatura	87
Figura 4.31, Comparativo de la entrada y salidas	87
Figura 4.32, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas	88
Figura 4.33, Comparativo de todos los sensores de temperatura	88
Figura 4.34, Comparativo de la entrada y salidas	89
Figura 4.35, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas	89
Figura 4.36, Comparativo de todos los sensores de temperatura	90
Figura 4.37, Comparativo de la entrada y salidas	90

Figura 4.38, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas	91
Figura 4.39, Comparativo de todos los sensores de temperatura	91
Figura 4.40, Comparativo de la entrada y salidas	92
Figura 4.41, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas	92
Figura 4.42, Comparativo de todos los sensores de temperatura	93
Figura 4.43, Comparativo de la entrada y salidas	93
Figura 4.44, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas	94
Figura 4.45, Comparativo de todos los sensores de temperatura	94
Figura 4.46, Comparativo de la entrada y salidas	95
Figura 4.47, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas	95
Figura 4.48, Comparativo de las salidas	97
Figura 4.49, Comparativo de las salidas normalizadas	97
Figura 4.50, Comparativo de las salidas	98
Figura 4.51, Comparativo de las salidas normalizadas	98
Figura 4.52, Comparativo de las salidas	99
Figura 4.53, Comparativo de las salidas normalizadas	99
Figura 4.54, Comparativo de las salidas	100
Figura 4.55, Comparativo de las salidas normalizadas	100
Figura 4.56, Comparativo de las salidas	101
Figura 4.57, Comparativo de las salidas normalizadas	101
Figura 4.58, Comparativo de las salidas	102
Figura 4.59, Comparativo de las salidas normalizadas	102
Figura 4.60, Comparativo de las descargas para todos los experimentos	103
Figura 4.61, Comparativo de las descargas normalizadas para todos los experimentos	103
Figura 4.62, Alimentación (Alimentación)	105
Figura 4.63, Descarga derecha (S. der)	106
Figura 4.64, Sensor derecho antes de la cortina (Der. f)	107

NOTACIÓN

A = Área (cm^2)

C = Concentración

d = Diámetro (cm)

Fr = Número de Froude

g = Fuerza de gravedad (ms^{-2})

Gr = Número de Grashof

h = Altura (cm)

L = Longitud (cm)

Mo = Número de Morton

P = Peso (Kg)

Q = Flujo (l s^{-1})

Re = Número de Reynolds

t = Tiempo (s)

T = Espesor del molde (cm)

$Temp$ = Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Tu = Número de distribuidor

$\bar{t}$ = Tiempo de residencia

T_{Θ} = Temperatura normalizada

U = Velocidad (ms^{-1})

V = Volumen (l)

Θ = Tiempo medio de residencia hasta 2θ

W = Ancho del molde (cm)

We = Número de Weber

$\frac{D}{vL}$ = Parámetro de dispersión

Subíndices

A = Alimentación

a = Región activa

D = Descarga

De = Muerto

f = Factor

F = Final

g = Gas

I = Inicial

m = Modelo

Me = Mezcla

min = Mínimo

mod = Modificado

p = Prototipo

P = Presión

$peak$ = Pico

Pi = Pistón

s = Acero

w = Agua

Letras Griegas

α = Coeficiente lineal de expansión térmica

β = Coeficiente de expansión volumétrico

Δ = Incremento

ε = Velocidad de disipación

κ = Energía cinética turbulenta

λ = Factor de escala

μ = Viscosidad (cP)

π = pi (3.1416)

θ = Tiempo adimensional

ρ = Densidad (gr cm⁻³)

σ = Tensión superficial (mNm⁻¹)

Θ = Tiempo medio de residencia hasta 2θ

OBJETIVO

Instalar cortinas de burbujas de aire en un modelo a escala del distribuidor de colada continua de acero tipo recto, para estudiar el efecto térmico que producen.

Trabajar con modelos anisotérmicos y aprovechando que el agua tiene propiedades físicas muy similares a las del acero líquido se empleará como fluido de trabajo, para estudiar sus patrones de flujo y con ello eliminar al máximo las zonas muertas dentro del distribuidor de colada continua.

Realizar la simulación matemática de los siguientes elementos: burbujeadores, inhibidor de turbulencia y distribuidor de colada continua. Además, construir el modelo a escala incluyendo burbujeadores e inhibidor de turbulencia.

JUSTIFICACIÓN

El acero es el primer componente de soporte en todo tipo de estructuras empleadas en: viviendas, transportes, vías de comunicación, etc.

Por tanto, se hace énfasis en su producción total anual que se reportó para el año de 2006 con 16.3 millones de toneladas¹, lo que nos indica que es un material vigente de gran uso que representa económicamente el 2.1% del producto interno bruto total (PIB), el 9.1% del PIB industrial y el 13.4 del PIB manufacturero. Además, se debe mencionar que del acero que se produce en México el 99.7%² se produce por colada continua. Es por lo anterior que el acero exige mejoras en sus propiedades químicas y mecánicas para ampliar su posición en el mercado nacional e internacional; por tanto los estudios dirigidos al distribuidor de colada continua es una opción que tiene la industria para alcanzar estas exigencias.

¹CANACERO, febrero de 2007

²CANACERO enero-junio del 2004

RESUMEN

En el presente trabajo por medio de un modelo físico que se construyó en acrílico a escala 1:6 tomando como base de diseño el criterio de similitud de Froude y utilizando agua y aire como fluidos de trabajo, se simuló y analizó el efecto térmico que provoca la inyección de argón en el acero líquido contenido en un distribuidor prototipo recto de colada continua de la planta Mittal Steel Co. del Puerto de Lázaro Cárdenas Michoacán. En el fondo del modelo se ubicaron dos dispositivos generadores de burbujas, los cuales constan de un medio poroso y una caja de viento cada uno. En la caja de viento se inyectó aire; el medio poroso en contacto con el agua simula las cortinas de argón en el acero líquido del proceso real. Se ubicó también en el fondo un dispositivo modificador de flujo conocido como inhibidor de turbulencia.

De forma alterna, se simuló el distribuidor con los dispositivos antes mencionados mediante un modelo matemático. Para esta tarea se utilizó un paquete comercial de CFD (Computational Fluid Dynamics) conocido como FLUENT[®], con el fin de optimizar el tiempo experimental.

Lo relevante de este trabajo es que al estudiar los efectos térmicos generados por la operación del distribuidor con cortinas de burbujas de argón, se puede en base a los resultados obtenidos adicionar un sistema de calentamiento externo al baño metálico con el fin de homogenizar la temperatura y con ello reducir la zona transiente del acero; liberando de esta forma a la industria siderúrgica de gastos adicionales en el reprocesamiento de productos.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El distribuidor, es un reactor metalúrgico clave en la producción de aceros, por el proceso de colada continua. En un principio se consideraba solo como el recipiente que estaba sujeto exclusivamente a proveer del acero líquido suficiente y de manera ininterrumpida al molde de colada continua; además de facilitar el cambio de olla manteniendo la secuencia de la colada.

Desde hace un poco más de 20 años el distribuidor de colada continua es considerado como un reactor metalúrgico en el cual ocurren diversas operaciones fisicoquímicas relacionadas con la temperatura. Siendo éste uno de los principales responsables de mantener, aumentar o disminuir la calidad del acero líquido que llega al molde oscilatorio, en la etapa final del proceso de colada continua.

Debido a las altas temperaturas de operación en este reactor (alrededor de los 1600 °C), es difícil realizar observaciones directas del comportamiento del flujo del metal líquido; por tal motivo se han desarrollado novedosos métodos de estudio que ofrecen resultados de gran validez y aceptación para cubrir esta dificultad, tales métodos se describen a continuación:

a) El modelado físico utilizando agua como fluido de trabajo.

El modelado con agua, es una herramienta efectiva y económica empleada para estudiar el flujo del acero líquido en el distribuidor. Ya que el agua cuenta con una viscosidad cinemática muy similar a la del acero y también ofrece un medio transparente al cual se le pueden adicionar colorantes y trazadores para estudiar de forma minuciosa los patrones de flujo ya sea en el distribuidor o en el molde.

Es preferible construir modelos a escala 1:1 (criterio de Froude – Reynolds)^{[5], [13]}, pero cuando no se pueden construir por cualquier limitante llámese económica y/o por falta de espacio; se pueden construir modelos a escala del prototipo siguiendo el criterio de

similitud de Froude.

Sea cual fuese la escala, se debe garantizar la similitud entre ambos sistemas y para ello se deben de cumplir los siguientes criterios ^[5]:

1. Similitud geométrica.
2. Similitud cinemática.
3. Similitud dinámica.
4. Similitud térmica.

Estos criterios involucran los siguientes números adimensionales:

- Número de Reynolds.
- Número de Weber.
- Número de Froude.
- Número de Tundish.
- Número de Grashof.

La dependencia de fuerzas que cada número adimensional involucra y la relación de éstos con los criterios de similitud se describirán a detalle más adelante.

b) Modelado matemático usando paquetes comerciales de simulación.

Es una herramienta muy novedosa en la cual el flujo del metal fundido es representado por la ecuación turbulenta de Navier-Stokes. Para su solución se emplean procedimientos que involucran métodos numéricos como, diferencias finitas, elemento finito, volumen finito^[5], etc.

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento en las direcciones longitudinal, transversal y vertical se resuelven mediante técnicas numéricas como se mencionó.

El flujo del baño metálico para cualquier diseño de distribuidor puede ser caracterizado resolviendo el comportamiento estándar del flujo del fluido y la transferencia de calor involucrada; asociado todo a las ecuaciones de turbulencia. Las ecuaciones referidas al flujo turbulento y transferencia de calor son fácilmente encontradas en todos los textos de fenómenos de transporte ^[5].

El conjunto de ecuaciones más usado en el modelado matemático es el conocido como κ - ϵ de dos ecuaciones; y las ecuaciones que involucra son:

- Ecuación de continuidad.
- Ecuación de balance de momento (tres ecuaciones, **x**, **y** y **z**).
- Ecuación de la energía cinética turbulenta, κ y las ecuaciones de disipación para evaluar la viscosidad turbulenta.
- Ecuación de transferencia de calor.

Hay un gran número de programas comerciales disponibles, para cálculos computacionales de dinámica de fluidos (CFD).

Algunos paquetes comerciales son:

- ✓ PHOENICS
- ✓ FIDAP
- ✓ CFD-ACE
- ✓ FLUENT
- ✓ METFLOW-3D
- ✓ STAR-CD
- ✓ FLOW-3D

El modelado matemático abarca de manera adicional las áreas de:

- Caracterización del flujo de fluidos.
- Estudio de flujos multifásicos.
- Estudio del comportamiento de las inclusiones no – metálicas.
- Efecto térmico durante el cambio de olla, entre otras

CAPÍTULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1.- Importancia del proceso de colada continua de acero.

La colada continua se comenzó a desarrollar en 1950, pero Henry Bessemer fue el primero que ideó y patentó esta máquina, en la segunda mitad del siglo XIX.

La máquina proyectada por Bessemer (1856), que por cierto no se llegó a construir, debía colar el acero líquido entre dos cilindros metálicos refrigerados interiormente, como se muestra en la figura 2.1. ^[1]

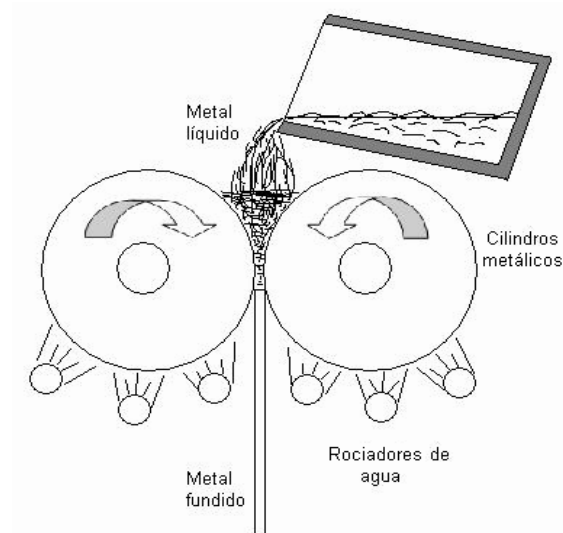


Figura 2.1, Máquina de Colada Continua de Bessemer ^[1]

Uno de los factores que más contribuyó al éxito de la colada continua fue, el empleo del molde metálico oscilante refrigerado con agua, inventado por Siegfried Jughans; patentó su creación en Alemania en 1933 y en los Estados Unidos de Norteamérica en 1938, las primeras máquinas de tipo experimental las construyó en 1943. A este científico se le considera el inventor de la colada continua.

En un principio, la colada continua se utilizó para la fabricación de latón, bronce, aluminio y otras aleaciones ligeras, antes que para los aceros. Sus ventajas más notorias son:

- No es necesario el empleo de grandes trenes de laminación para lingotes o planchón de mayor precio que la nave de colada continua.
- No se necesita fabricar lingotes como producto intermedio en el proceso de fabricación de barras.
- Se eliminan dos fases clásicas del proceso muy costosas, como: a) obtención de lingotes y b) laminación de lingotes.
- Se reduce la pérdida de material por despunte de los lingotes.
- Se obtienen productos de gran uniformidad y se evita la segregación de diversos elementos, principalmente C, P y S.
- Se reduce el tiempo de procesamiento y por ende los costos de producción.
- Los gastos de instalación de una planta de colada continua son inferiores a los de un tren de lingotes.
- En colada continua se obtienen aproximadamente en palanquilla útil un 93% del peso en chatarra cargada a los hornos eléctricos de arco; en cambio, en lingotera se obtiene en palanquilla de un 83% a un 90% del peso en chatarra cargada al horno.

Actualmente, se conocen cuatro tipos diferentes de Nave de Colada Continua, los cuales se mencionan a continuación:

- a) De molde vertical recto.
- b) De molde vertical, con doblado de la palanquilla solidificada en caliente.
- c) De molde vertical, con doblado de la palanquilla en la zona de refrigeración secundaria, cuando todavía está el acero sin solidificar en su interior.
- d) De molde curvo, con enderezado progresivo de la palanquilla.

2.2.- Descripción del proceso de colada continua de acero.

Las principales partes que constituyen una nave de colada continua son las que siguen ^[1]:

- La olla, es un dispositivo al cual se cuela directamente el acero proveniente del horno eléctrico de arco o alto horno. Hay tres tipos de olla diferentes: olla con buza y tapón para colar por el fondo (es la más usada), olla con tabique tipo sifón y olla con tabiquillo para separar la escoria.
- Distribuidor de colada, que sirve para regular con precisión el caudal de acero por medio de dos a seis líneas que alimentan los moldes presentes. En este nivel

es en donde se centran todos los estudios y experimentos realizados en este trabajo de investigación.

- Uno o varios moldes según las líneas de descarga, generalmente el molde es de cobre, cuyas paredes son huecas o están perforadas longitudinalmente para que puedan ser enfriadas por un fuerte caudal de agua. Este dispositivo realiza un movimiento vertical alternativo de ascenso y descenso (oscilatorio), que es la clave del proceso para que el acero por gravedad y con la ayuda de algún lubricante salga por el fondo.
- La cámara de enfriamiento, constituida por un conjunto de rociadores de agua que, al mojar la periferia del producto realizan el enfriamiento secundario en la tercera fase de su camino descendente.
- Zona de enfriamiento del acero al aire libre.
- Mecanismo con rodillos que actúa como conductor y es el que mueve y conduce a la barra de acero en su recorrido descendente. En algunos casos hay rodillos adicionales que doblan la barra para que sea recta; y siga ésta en dirección horizontal.
- Sistema de corte con oxígeno para dejar la barra a la medida especificada.
- Sistema de grúas para recoger, almacenar y trasladar las barras o palanquillas.

En la figura 2.2 se ilustran las etapas más importantes de la colada continua.

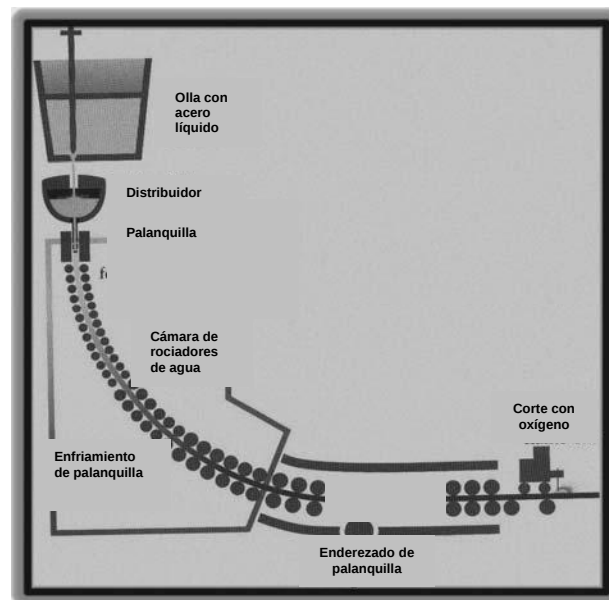


Figura 2.2, Nave de Colada Continua^[2]

2.3.- El Distribuidor.

El distribuidor es un reactor esencial en la producción de acero dentro del proceso de colada continua. La calidad del acero líquido depende en gran medida del grado de control que se tenga entre la fase escoria, la fase gas y el refractario.

El punto esencial de la participación del distribuidor en este proceso es el control, de lo contrario este reactor contaminaría al producto líquido^[3]. Si la calidad adquirida del acero líquido por refinación secundaria se pierde en el distribuidor, el proceso de limpieza se complica en el molde ya que el tiempo de residencia es muy limitado, y como es la última etapa del proceso de colada continua, la refinación se tiene que llevar antes de que el acero solidifique^[4].

En un principio, se consideraba al distribuidor solo como un recipiente sujeto a proveer el suficiente acero líquido de manera continua al molde, además debía de facilitar el cambio de olla sin interrumpir la secuencia de colada; pero hace aproximadamente veinte años, ha sido considerado un reactor metalúrgico, debido a que es un recipiente en donde ocurren diversas operaciones que exigen tanto control térmico, como fisicoquímico y como fluidinámico^[5].

Un distribuidor bien diseñado y con una adecuada operación debe de:

- Promover la flotación de inclusiones al maximizar su tiempo de residencia.
- Garantizar la absorción de las inclusiones por una escoria no corrosiva.
- Prevenir las pérdidas térmicas.
- Minimizar las zonas muertas y de recirculación.
- Mantener constante la composición química.

2.3.1.- Tipos de Distribuidores.

Hasta hace algunos años, los diversos conceptos de diseño del distribuidor fueron dirigidos a la operación en condiciones estables, en vez del estado transitorio o inestable, debido a que era usado como un recipiente inerte entre la olla y el molde.

Hoy en día, las funciones del distribuidor han aumentado y cobraron una significativa importancia, ya que se utiliza para la remoción de inclusiones, para lograr un equilibrio térmico del baño metálico, para promover y asegurar un ambiente no reactivo con base a la cinética química y a la termodinámica.

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.

Cuando se selecciona un diseño de distribuidor para una producción de acero específica, se debe considerar lo siguiente:

- Productos a colar.
- Número líneas disponibles, en relación a la producción.
- Dispositivos de limpieza.
- Espesor de las líneas y su configuración.
- Costos necesarios para el distribuidor y sus accesorios.
- Capacidad para ampliar la producción.
- Disminución del rendimiento.

El tamaño del distribuidor es definido por el ángulo, ancho, largo y alto de sus paredes, mientras que su forma geométrica es dictada algunas veces por el número de líneas, otras por el espacio disponible.

- Tipo recto. Es probablemente el diseño más usado (diseño empleado en el presente trabajo de investigación). Se encuentra también con algunas variaciones en su base rectangular, como apariencia de ataúd. Esta forma contiene una o varias líneas y es utilizado tanto para colar palanquilla como planchón. Ver figura 2.3 y 2.4^[7].

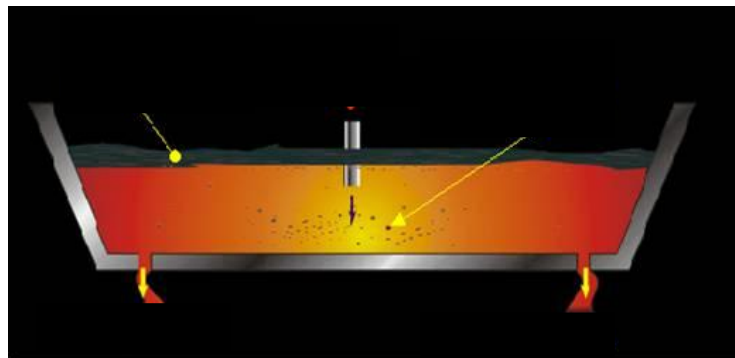


Figura 2.3, Vista lateral del distribuidor tipo recto^[6]

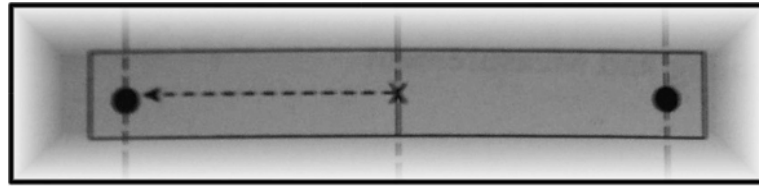


Figura 2.4, Vista en planta del distribuidor tipo recto^[7]

- Tipo V. Es el diseño más usado en Europa que en otras partes del mundo, utiliza ollas de mayor capacidad que las convencionales, su geometría se muestra en la figura 2.5^[7].

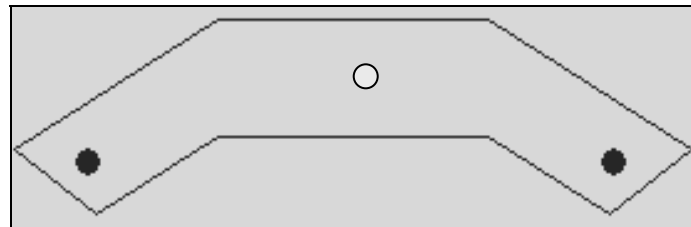


Figura 2.5, Vista en planta del distribuidor tipo V^[7]

- Tipo C. Es la combinación del distribuidor tipo "V" y el tipo recto, como se observa en la figura 2.6^[7].

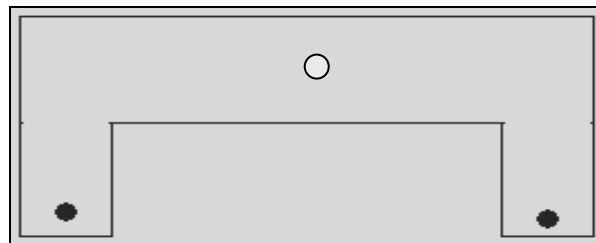


Figura 2.6, Vista en planta del distribuidor tipo C^[7]

- Tipo T. Es principalmente para máquinas que cuelan palanquilla y planchón, está modificado por una caja que se separa de la región central, ver la figura 2.7^[7].

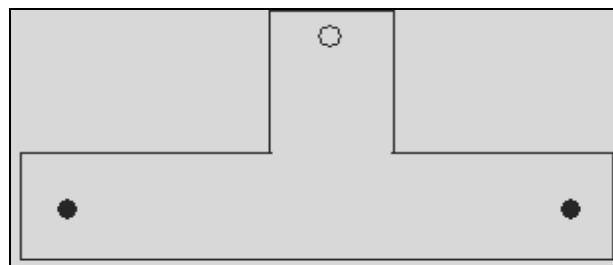


Figura 2.7, Vista en planta del distribuidor tipo T^[7]

- Tipo delta. Es el más moderno de los distribuidores para colar palanquilla; con pared en V cerca de la descarga de la olla. Comparado con el de la forma rectangular, tiene la ventaja de fácil acceso al molde y mayor protección para operar las diversas líneas, como se muestra en la figura 2.8^[7].

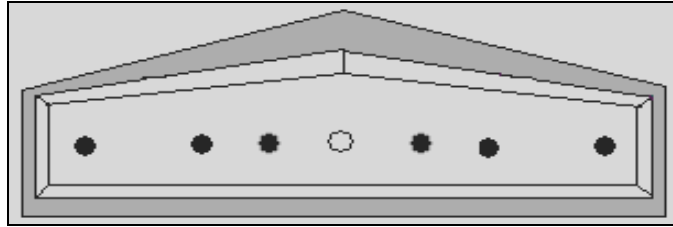


Figura 2.8, Vista en planta del distribuidor tipo delta^[7]

- Tipo H. Es una de las más recientes evoluciones en diseño del distribuidor, es usado en Nipon Steel's Nagoya desde hace 20 años. Este tipo se ha usado en una nueva máquina para colar delgadas laminillas, utiliza compuertas hidráulicas para controlar el flujo del acero al molde y de esta manera fomentar el estado estable del flujo. Este diseño disminuye el acero transiente y evita las pérdidas de calor a través de las paredes, debido a las variaciones del nivel; se puede observar en la figura 2.9^[7].

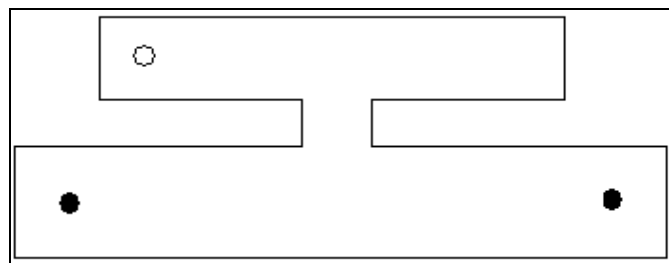


Figura 2.9, Vista en planta del distribuidor tipo H^[7]

Independientemente de la perspectiva de flujo (estable – inestable) un distribuidor debe dar:

- Suficiente volumen para realizar el cambio de olla.
- Una profundidad apropiada.
- Distribución uniforme del flujo en todos los hilos.
- Óptimo tiempo de residencia para flotar inclusiones.
- Una superficie en reposo (escoria).
- Aislamiento térmico, químico y refractarios adecuados.

- Descarga ligera para optimizar el rendimiento.

2.3.2.- Dispositivos modificadores de flujo (DMF).

Son artefactos de geometría más o menos simple con o sin perforaciones, hechos de material refractario resistente a altas temperaturas; tales dispositivos se colocan dentro del distribuidor, con la finalidad de modificar de manera benéfica el flujo del acero, reduciendo el flujo muerto, el flujo recirculatorio y las zonas frías en el baño metálico. Estos dispositivos son: las represas o mamparas que específicamente sirven para redireccionar las inclusiones hacia la capa de escoria, su geometría y ubicación se muestran en la figura 2.10.

2.3.2.1 .- Inhibidor de turbulencia.

Barrera y Barreto^[8], indican que el uso de inhibidores de turbulencia es extremadamente útil para incrementar los tiempos de residencia, disminuir las zonas muertas y evitar el “salpicadero” y con ello la erosión del refractario al momento del vaciado del acero líquido. También expresan la importancia del uso de las cortinas de burbujas de argón; las que incrementan el mezclado además de promover el choque, aglomeración y flotación de las inclusiones no metálicas.

2.3.2.2 .- Burbujeadores.

Los dispositivos burbujeadores, generan burbujas a partir de la inyección de Argón en uno o varios medios porosos, situados estratégicamente en el piso del distribuidor y los cuales se utilizan para incrementar el ascenso natural de las inclusiones hacia la escoria e incrementar el mezclado.

Yamamura y Ueshima^[9], en su trabajo indican algunos detalles importantes sobre el trabajar con burbujas; en la flotación de burbujas actúan tres fuerzas, boyantes, cortantes y adhesivas. Cuando la resultante de las fuerzas boyantes y cortantes comienza a crecer más que la resultante de las fuerzas de adhesión, la burbuja deja la superficie del medio poroso y flota.

Las burbujas generadas en el baño de acero llegan a ser un poco mayores que las generadas en baño de agua, hasta casi el doble del diámetro de las últimas.

La coalescencia de burbujas es generada por la mala mojabilidad del baño con relación al medio poroso.

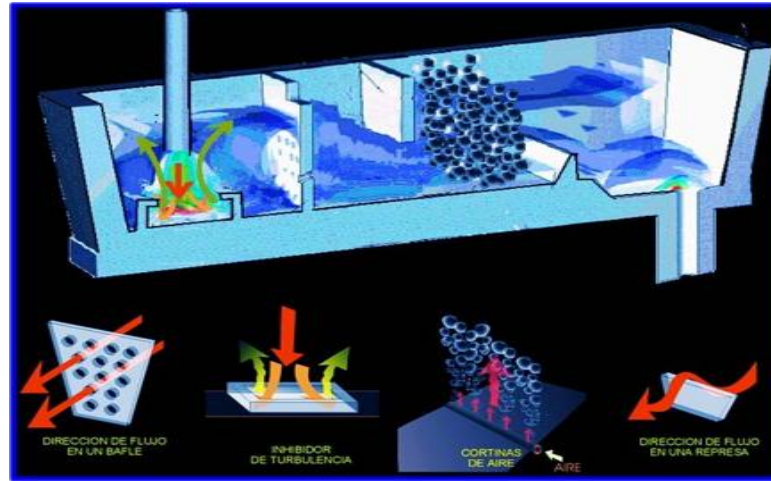


Figura 2.10, Dispositivos modificadores de flujo

2.3.3.- Características deseables en los refractarios.

Para proteger el acero se utiliza refractario y gas (Ar), cuando se descarga de la olla al distribuidor de colada continua. El refractario es otra parte metalúrgica importante, en donde éste debe ser inerte y no contribuir a la formación de inclusiones exógenas. Los refractarios actualmente están diseñados para que reaccionen con las inclusiones sólidas y formen compuestos líquidos que no obstaculicen el flujo del acero a través de las descargas, también los refractarios tienen la función de reducir los óxidos^[10].

2.4.- Modelación física de los procesos metalúrgicos.

La modelación física es la forma más económica y eficiente que hay para validar los resultados obtenidos de la simulación matemática.

2.4.1.- Definición.

El modelado físico utilizando agua como fluido de trabajo es una herramienta efectiva y económica, empleada para comprender el flujo del acero en el distribuidor. Ya que el agua ofrece un medio transparente.

Guthrie^[11], sugiere que antes de modelar cualquier fluido se debe de tener en cuenta lo siguiente: un fluido es una sustancia que no presenta esfuerzos de corte en reposo (sin movimiento). De hecho, un sistema estable se presenta en un baño de acero líquido que puede estar en un recipiente adiabático, pero si se presenta una pérdida de calor

por mínima que sea entre las paredes y el acero se generará un gradiente considerable en la densidad del acero líquido y por tanto habrá movimiento.

Sahai y Damle^[12], explican que el modelado con agua, además de ser relativamente barato, ofrece una observación directa del comportamiento del flujo; cosa que es imposible de hacer con modelos contruidos a escala original o escala reducida de plantas piloto, debido a las elevadas temperaturas a que se realiza la operación.

La selección de escala es principalmente dictada por las necesidades del usuario y no por el espacio y capital disponibles. En la tabla 2.1 se enfatiza por qué el agua es ideal para simular el acero.

Heaslip y McLean^[13], indican las ventajas de trabajar con modelos a escala reducida, en los cuales se puede estudiar: el flujo patrón relacionado con el fenómeno de la formación de vórtice, la distribución del tiempo de residencia del fluido retenido. Dependiendo del factor de escala seleccionado se puede observar el mezclado ya que es función de la intensidad de la turbulencia.

Tabla 2.1. Comparación entre las propiedades físicas del acero y el agua

Propiedad	Acero (1600 °C)	Agua (20 °C)
Viscosidad (cP)	6.4	1
Densidad (g / cm ³)	7.08	1
Viscosidad cinemática (cs)	0.904	1
Tensión superficial (mN / m)	1900	7.3

Se puede observar, que la relación de la densidad del acero y del agua es de 1:7, lo sobresaliente de la tabla 2.1 es de hecho que la viscosidad cinemática entre ambos fluido es casi idéntica, por ello el agua es un fluido que sirve para modelar con precisión y repetitividad el flujo de acero. De manera adicional el agua es segura de manipular, es un medio transparente al cual se le pueden agregar diversos trazadores y colorantes para el estudio del flujo.

2.4.2.- Criterios de diseño.

Con el fin de que los resultados de los experimentos realizados en modelos a escalas diversas, pueden ser representativos de lo que ocurre realmente en el equipo prototipo, se deben cumplir una serie de requerimientos mejor conocidos como: criterios de similitud, enseguida se define cada uno de ellos.

Sahai y Damle^[12], recomiendan que para simular el flujo en el distribuidor debe existir similitud, específicamente térmica entre el modelo y el prototipo además de geométrica, dinámica y cinemática. Para ello debe haber una relación constante de los diversos mecanismos de transferencia de calor en ambos sistemas es decir, la relación de pérdida o ganancia de calor por los diversos mecanismos es la misma en ambos sistemas.

2.4.2.1.- Similitud geométrica.

Heaslip^[13], define la similitud geométrica como un factor de escala, el cual requiere que la proporción de todas las longitudes, áreas y volúmenes mantengan un valor constante, es decir:

$$\lambda = \frac{L_p}{L_m} \quad (2.1)$$

La figura 2.11 nos indica la relación que hay entre un reactor de dimensiones H1 y T1 con uno a escala menor de dimensiones H2 y T2.

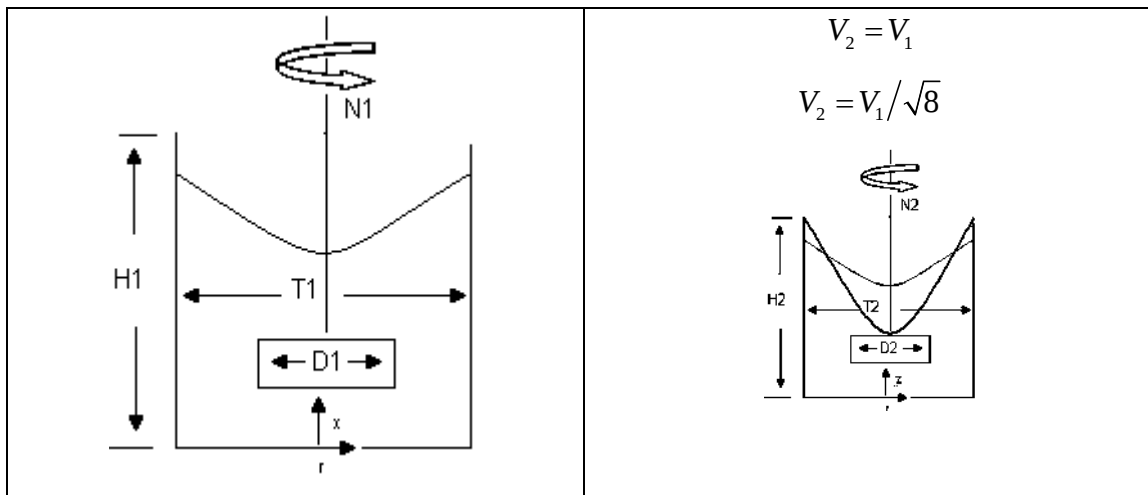


Figura 2.11, Criterios de similitud para un reactor agitado^[14]

2.4.2.2.- Similitud dinámica y similitud cinemática.

La similitud dinámica.- Es la magnitud de las fuerzas correspondientes a cada punto en un sistema de proporciones ajustadas.

La similitud cinemática.- representa la similitud de movimiento. Las líneas de flujo en un sistema son geométricamente similares a las líneas de flujo del otro sistema.

Las relaciones a cuidar en la similitud dinámica y la similitud cinemática son fuerzas de inercia, gravitacionales, viscosas y de tensión superficial; aceleración, velocidad y gasto volumétrico respectivamente ^[16].

Szekely^[15] y Heaslip^[13], indican que tanto la similitud dinámica como la similitud cinemática, explican que la trayectoria del fluido y las fuerzas dinámicas entre el modelo y el prototipo son equivalentes en magnitud, dirección y geometría. La similitud cinemática será aproximada debido a la similitud geométrica, solo si el sistema posee similitud dinámica.

Específicamente la similitud dinámica es la relación que hay entre las líneas de fuerza en sistemas con similitud geométrica, iguales a las líneas de fuerza del otro sistema.

$$V_m = \frac{V_p}{\lambda} \quad (2.2)$$

$$Q_m = \frac{Q_p}{\lambda} \quad (2.3)$$

2.4.2.3.- Similitud térmica.

Es algunas veces ignorado, por el argumento de que cuando se considera la magnitud en regiones donde domina la convección forzada, como en el distribuidor, el fenómeno térmico puede ser ignorado.

Estudios recientes por Sahai y Lowry^[17], Sahai y Chakraborty^[18] han demostrado que el fenómeno térmico puede resultar significativo para entender el comportamiento del flujo del fluido, principalmente durante el cambio de olla; donde el acero nuevo es mezclado en el distribuidor con el acero viejo bajo condiciones potencialmente anisotérmicas. Dependiendo de las diferencias térmicas en el calor absorbido o emitido, el flujo cinético es modificado y la recirculación alcanza y altera el flujo de las líneas de colada.

Por tanto, la similitud térmica se asegura cuando los números adimensionales involucrados en la transferencia de calor son iguales en ambos sistemas. Es decir, la siguiente ecuación asegura la relación térmica en ambos sistemas.

$$\Delta T_m \beta_m = \Delta T_p \beta_p \quad (2.4)$$

Además, los modelos físicos que utilizan el criterio de similitud térmica, muestran una mejor aproximación de la realidad física del fenómeno y pueden ser más confiables para interpretar y comprender las características de los patrones de flujo de acero dados en un distribuidor industrial.

2.5.- Números adimensionales.

Las principales fuerzas involucradas en los criterios de diseño son: las fuerzas gravitatorias, las fuerzas viscosas, las fuerzas de tensión superficial, las fuerzas de inercia y las fuerzas boyantes o de flotación; los grupos adimensionales que involucran estas fuerzas son:

Número de Froude

$$Fr = \frac{V^2}{g \cdot L} = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas gravitatorias}} \quad (2.5)$$

Número de Reynolds

$$Re = \frac{V \cdot L}{\mu} = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} \quad (2.6)$$

Número de Weber

$$We = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot L}{\sigma} = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de tensión superficial}} \quad (2.7)$$

Número de Tundish

$$Tu = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{\text{Fuerzas boyantes}}{\text{Fuerzas de inercia}} \quad (2.8)$$

Por ser el caso más usual, el número de Reynolds representa la relación de las fuerzas de transferencia de momento por las fuerzas inerciales y difusivas. En el flujo del

distribuidor, las fuerzas inerciales se incrementan debido al momento del flujo de entrada. De hecho el flujo en un distribuidor es turbulento, la transferencia difusiva de momento toma lugar a través de la interacción de los remolinos que son turbulentos.

Para un sistema como el que fue objeto de estudio en el presenta trabajo, en donde se localizan las fases gas - líquido, debe mencionarse que el número, tamaño y distribución de burbuja depende de las fuerzas inerciales y de tensión superficial, por lo que se hace el uso del número de Morton.

$$Mo = \frac{g \cdot \mu^4}{\rho \cdot \sigma^3} = \frac{\text{Fuerzas gravitacionales} \cdot \text{fuerzas viscosas}}{\text{Fuerzas de tension superficial}} \quad (2.9)$$

Y en adición, el comportamiento de un sistema gas – líquido, puede ser caracterizado por el número de Froude modificado, la expresión correspondiente es la que sigue:

$$Fr_{\text{mod}} = \frac{\rho \cdot g \cdot V^2}{(\rho - \rho_g) \cdot g \cdot L} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas gravitacionales}} \quad (2.10)$$

Número de Grashof

$$Gr = \frac{\rho^2 \cdot \beta \cdot g \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\mu^2} = \frac{\text{Fuerzas boyantes}}{\text{Fuerzas viscosas}} \quad (2.11)$$

La similitud dinámica absoluta requiere que cada una de los grupos adimensionales enlistados anteriormente, tengan el mismo valor en ambos sistemas, pero es muy difícil satisfacer cada uno de estos criterios de un solo modelo a una escala en particular^[19].

La importancia de algunos de los grupos adimensionales anteriores reside en observar los siguientes casos para la caída de un flujo líquido en un baño líquido, caso muy similar al de la buza de alimentación al distribuidor de colada continua:

➤ Entrada del flujo de acero líquido.

Las fuerzas predominantes son inerciales y gravitacionales, por tanto el número de Froude satisface este comportamiento.

- Profundidad que alcanza el flujo de acero líquido.

Las fuerzas involucradas son inerciales, y de tensión superficial por tanto, el número de Weber es el que guarda tal relación.

- Propagación del flujo de acero líquido.

Las fuerzas participantes son: las viscosas e inerciales, y el número de Reynolds explica este comportamiento.

Para seleccionar una escala de 1:1 se requiere similitud en la relación Reynolds – Weber. Si se indica una escala de 0.6 (3/2), debe de tener similitud el criterio de Weber – Froude; si hay flujo bifásico presente se complica tal justificación al seleccionar una escala cualquiera.

Para simular el flujo en donde predominan las fuerzas gravitacionales, como en un sistema de colada continua, el criterio de Froude puede ser resuelto para un modelo a cualquier escala, solo si se cumple la similitud geométrica.

El desarrollo del modelo de Froude, criterio empleado para la construcción del equipo usado en los presentes experimentos se puede observar a detalle en el capítulo siguiente.

2.6.- Curvas de distribución de tiempo de residencia (DTR).

Estas curvas proporcionan la información necesaria para interpretar los flujos presentes en el modelo.

Una vez determinado el modelo para el estado estable e inestable, se debe seleccionar la técnica por la cual se cuantificará el comportamiento del fluido, algunas técnicas son:

- Inyección de color, usando como cuantificador un colorímetro.
 - 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 trazador y filmar la trayectoria del líquido con una cámara rápida.
- Entre otras técnicas y equipos más novedosos.

En fin, dependiendo del estudio a realizar se debe de seleccionar alguna de las técnicas anteriores, pero para el caso del distribuidor, el flujo del fluido se puede caracterizar por medio de las curvas DTR's ^[20].

Las curvas DTR's son frecuentemente graficadas como concentración adimensional, temperatura adimensional contra tiempo adimensional. El tiempo estándar en las abscisas es expresado usando una función matemática TMR (Tiempo Medio de Residencia), el cual es definido como una porción del volumen de trabajo del distribuidor con una velocidad de flujo volumétrico.

Estas curvas pueden ser obtenidas por monitoreo de temperaturas del fluido a la salida del sistema. Bajo condiciones de flujo turbulento, el número de Prandtl y el número de Schmidt son muy cercanos a la unidad por tanto, la concentración adimensional y la distribución de la temperatura podría ser muy similar.

Los trazadores que tienen densidad variante, como son las soluciones salinas, generan una ligera alteración en el perfil de las curvas de distribución, comparados con los de densidad invariante, como es la tinta. Pero, los trazadores con densidad variante son usados debido a que la variación es mínima y los resultados pueden ser repetidos y además proveen una gran validez para estos reactores^[21].

2.6.1.- Curva C (adición de trazador en forma de pulso).

Esta técnica es empleada para modelar tanto el estado estable como el inestable del baño metálico, ofrece optimizar la configuración de los accesorios modificadores de flujo del distribuidor y optimizar también su operación.

La inyección de un pulso de trazador coloreado no solo muestra el flujo patrón dentro del modelo construido en acrílico, sino también ofrece el perfil de la concentración a la salida por los hilos del modelo. Esta información se puede graficar como función del tiempo, como se muestra en la figura 2.12.

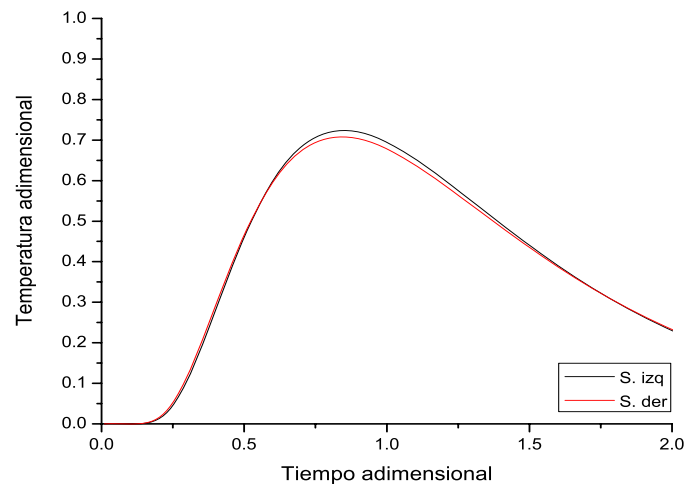


Figura 2.12, curva C [22]

Cuando la corriente del fluido que entra al recipiente no contiene trazador alguno y le imponemos una señal en forma de 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.

En simples palabras es lo que se conoce en estadística como Distribución de Frecuencias Normalizadas.

2.6.2.- Curva F.

Son el conjunto de datos que se obtienen por los instrumentos empleados en los equipos experimentales, la figura 2.13 muestra la información referida.

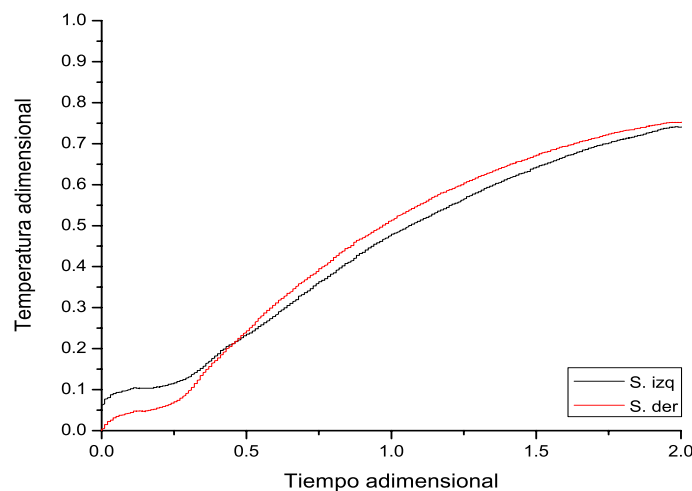


Figura 2.13, Curva F

Cuando la corriente del fluido que entra al reactor no contiene trazador alguno, y le imponemos una señal trazadora en escalón, de concentración C_0 en la corriente del fluido que entra al reactor, se denomina curva F a la curva representativa de la concentración del trazador a la salida del recipiente (midiendo esta concentración a la salida en función de su concentración a la entrada C/C_0) frente al tiempo.

La curva de la figura 2.13 es conocida como Acumulación de Frecuencias.

2.7.- Tipos de flujo (flujos no ideales).

Información importante como el volumen pistón, volumen mezclado y volumen muerto pueden ser deducidos de las curvas C. Esta información es usada para evaluar las condiciones de flujo y por lo tanto de operación del distribuidor en condiciones estables de colada. Es deseable tener un gran volumen pistón cuando hay cambio de grado ya que se disminuye la zona de transición y el consumo de refractario, un bajo volumen muerto y una superficie dirigida por el flujo para incrementar la flotación de inclusiones.

2.7.1.- Flujo pistón o tapón.

Ocurre cuando la velocidad del fluido es uniforme en toda la sección transversal 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^[50].

2.7.2.- Flujo mezclado o disperso.

Supone que el contenido del reactor es totalmente homogéneo a escala molecular, no hay ninguna diferencia entre las distintas porciones del reactor y las propiedades de la corriente de salida son idénticas a las del fluido contenido en el reactor^[50].

2.7.3.- Flujo muerto.

No tiene ningún propósito en el distribuidor y debe ser minimizado, ya que este no participa en los procesos de transferencia de calor y masa que ocurren dentro del distribuidor debido al lento movimiento de las partículas de fluido; el volumen muerto origina puntos calientes en donde puede haber mayor desgaste de refractario o bien, puntos fríos donde puede ocurrir una solidificación prematura y diferente microestructura^[22].

La figura 2.14 muestra el tipo de estancamientos (flujo muerto) que producen algunos dispositivos modificadores de flujo como pueden ser mamparas, bordes que forman ángulos de 90°, etc.

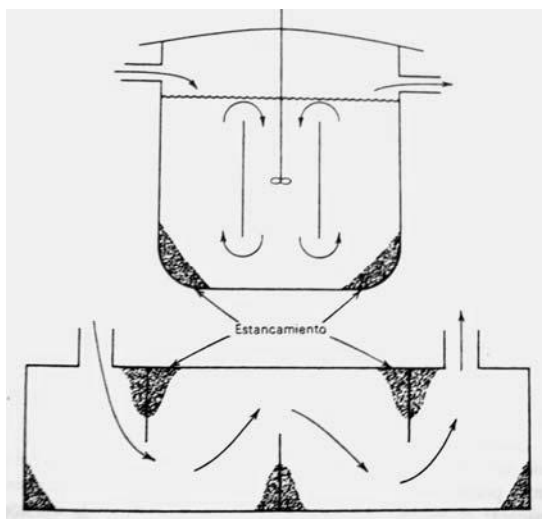


Figura 2.14, Estancamientos^[50]

Aunque Sahai y Emi^[28], hacen una aportación importante a los resultados de una gran cantidad de investigadores que consideraban a las zonas de flujo muerto como volumen despreciable, ya que creían que tal volumen nunca se movía. Por ello se consideraba que el volumen muerto era el área bajo la curva C después de haber transcurrido dos veces el tiempo medio de residencia. Todo esto llevó a una serie de correcciones en diversos trabajos alrededor del mundo. La forma correcta para calcular los diferentes tipos de flujo en un distribuidor se pueden observar en el apéndice uno de este trabajo.

2.8.- Caracterización de Burbujas.

En los procesos de aceración, específicamente en el distribuidor de colada continua, la implementación de cortinas de argón persigue el siguiente fin:

- Homogenizar la composición del baño metálico, cuando se adicionan materiales aleantes.
- Lograr que el baño metálico tenga la misma temperatura en cualquier punto del distribuidor.
- Atrapar y flotar la mayor cantidad de inclusiones posible, producir aceros más limpios.

En la construcción de modelos a escala se implementan estos dispositivos utilizando aire en vez del gas argón y cualquier material poroso que brinde un diámetro de burbuja aceptable dentro de los rangos recomendados 0.6 – 2.0 mm^[23].

Yamamura^[9], realiza algunas observaciones importantes en su trabajo como:

- La diferencia en el diámetro entre las burbujas de un baño de agua y acero, son determinadas por las diferencias de tensión superficial y densidad respectivamente.
- Las burbujas de argón de un baño de acero llegan a ser casi del doble de diámetro de las burbujas de un baño de agua.
- La coalescencia de burbujas es ocasionada por la mala mojabilidad del baño metálico respecto al medio poroso.
- El diámetro de burbujas disminuye si el baño está en movimiento.
- Cuando las burbujas rebasan cierto diámetro se deforman.
- En la flotación de inclusiones actúan tres fuerzas: boyantes, cortantes y adhesivas. Cuando la resultante de las boyantes y cortantes aumentan más que la resultante de las fuerzas de adhesión, la burbuja flota.

Algunos autores como Guthrie^[11] e Iguchi^[24] han encontrado la forma de realizar mediciones de diámetros de burbujas in – situ, con dispositivos patentados de gran utilidad para la industria del acero.

Iguchi^[25] y López^[26], refieren su trabajo al efecto que tiene la transferencia de calor del baño metálico hacia las burbujas de Argón; en donde concluyen que de éstas el diámetro aumenta por lo que las fuerzas boyantes al ser directamente proporcionales hacen que las burbujas floten rápidamente.

2.9.- Simulación Matemática de los Procesos Metalúrgicos.

Un modelo matemático generalmente consiste de ecuaciones algebraicas o diferenciales que representan cuantitativamente un sistema o un proceso. Por ejemplo, puede ser la relación que hay en el tiempo de vaciado requerido de una olla metalúrgica, el mecanismo de solidificación de un lingote, la caracterización del flujo de un distribuidor^[27], etc.

Las ventajas que se pueden obtener al emplear modelos matemáticos son de gran importancia ya que se reducen los tiempos en el diseño y construcción de modelos físicos, se disminuye el costo de la construcción y validan los resultados obtenidos del modelo físico^[28 - 40].

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1.- Diseño y construcción de los burbujeadores.

Los burbujeadores son dispositivos porosos, que tienen como principal objetivo generar burbujas en un medio acuoso, pueden ser contruidos de diferentes materiales y deberán de contar además con una caja de viento, la cual debe tener una configuración especial que asegure uniformidad en el flujo de aire que entra al medio poroso; con la finalidad de garantizar una cortina homogénea.

3.1.1.- Primer prototipo “tapones de arena”.

Para este prototipo, se utilizó arena con un alto contenido de sílice (90%), “arena para molde”, la cual se pasó por un tamiz de 150 μm . Como aglutinante se utilizó una resina sintética la cual consta de dos partes, un polímero y un catalizador; estas partes se mezclan en una relación 1:1.

Una vez hecha la mezcla, se adiciona la arena y con la ayuda de un mezclador ultrasónico en forma de lápiz se homogenizó y se introdujo en unos tubos de acrílico de 1.95 cm de diámetro y 5.08 cm de longitud.

El tubo se montó en una máquina de compactación, la cual aseguraba repetibilidad en cada una de los casos que consistía en un original y tres replicas. La máquina de compactación se construyó en madera de pino, a través de la cual pasa un tubo de acrílico de 1.90 cm de diámetro y 38.10 cm de longitud y a su vez, dentro de éste un redondo de nylamid se desliza compactando la mezcla arena – aglutinante, como se muestra en las 3.1 y 3.2.

Tanto la distancia de recorrido por el redondo como su peso, se cuantificaron para lograr reproducir el experimento en cada caso de estudio.



Figura 3.1, Redondo de Nylamid



Figura 3.2, Máquina de compactación

Una vez compactada la mezcla, se introdujo en el centro del medio poroso un pequeño tubo de polietileno de 0.5 cm de diámetro y 1 cm de longitud con el fin de darle forma a la cámara de distribución de gas (aire).

El medio poroso final se muestra en las figuras 3.3 y 3.4.



Figura 3.3, Tubo de acrílico y arena

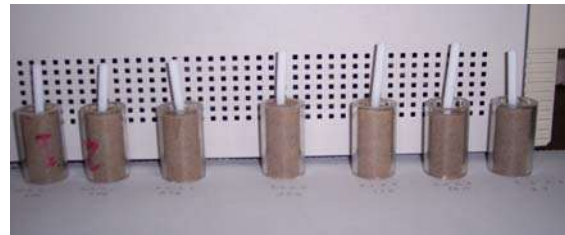


Figura 3.4, Primeros ensayos en tubo y arena

Las variables a considerar en este prototipo de aereador fueron, cantidad de aglutinante (ml), tiempo de mezclado (s), peso (gr) de arena alimentada al tubo y número de compactaciones.

La idea principal fue alimentar aire a la cámara y cuantificar el diámetro de las burbujas obtenidas mediante análisis de imágenes. Para ello no se tuvo que construir el equipo en el que se probarían los tapones de arena, ya que al hacer las primeras pruebas en un recipiente con agua se detectó que las siete pruebas preliminares con sus tres replicas no funcionaron por lo que se buscó otra alternativa que diera resultados y con menos variables de control.

3.1.2.- Segundo prototipo usando una lona sintética y acrílico.

Al eliminar el concepto de los tapones de arena, se diseñó un medio poroso fabricado con lona sintética comercial que ofreciera un diámetro de burbuja adecuado. De esta forma solo quedaría por diseñarse la caja de viento y por último construirse en acrílico. La lona sintética, de manufactura canadiense, ofrecía en prácticas experimentales anteriores una buena resistencia y durabilidad, por lo que se decidió cortar once pedazos de lona de 2.0 cm de ancho por 20.0 cm de largo.

El aspecto micrográfico de la lona sintética es el que se muestra a continuación en la figura 3.5.

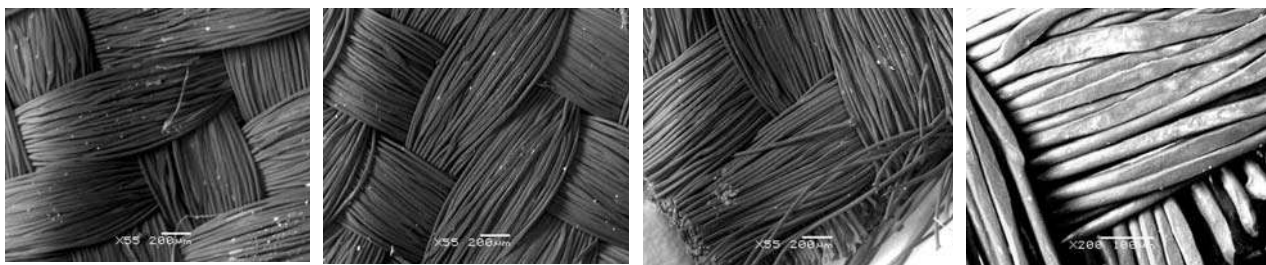


Figura 3.5, Micrografías de la lona sintética

El área efectiva de burbujeo de la lona sintética fue de 1.0 cm de ancho por 19.0 cm de largo. En seguida se apilaron los trozos de lona una sobre otra, se sujetó la lona en forma de emparedado con unos marcos de acrílico de 0.9 cm de espesor. Por último se selló con resina, pegamento y silicón comercial los extremos para evitar fugas de aire. La apariencia final del burbujeador se muestra en la figura 3.6. En las pruebas donde se inyectó aire se llevó a cabo análisis de imágenes de las burbujas generadas.



Figura 3.6, Vista en planta del burbujeador

La caja de viento, de forma rectangular, se construyó en acrílico con una inclinación en su cámara de aire de aproximadamente 45° para compensar la caída de presión en el

trayecto que recorría el aire de la entrada al fondo de la cámara, todo con el fin de tener una cortina de burbujas uniforme, en las figuras 3.7 - 3.10 se puede observar al conducto por donde se inyecta el aire.

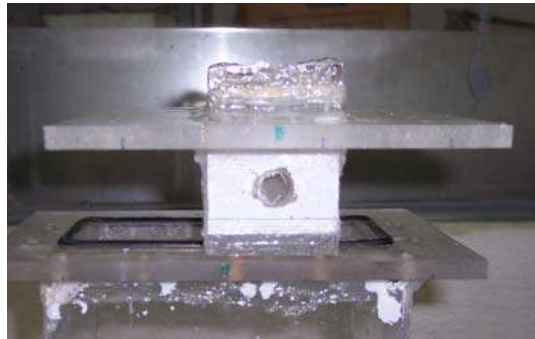


Figura 3.7, Vista frontal del burbujeador

Finalmente se unió la caja de viento con el medio poroso (burbujeadores) sellándose para evitar fugas de aire. El dispositivo se montó en una cámara de agua para realizar pruebas de uniformidad de la cortina de burbujas, revisar posibles fugas y el análisis de imágenes para cuantificar el diámetro de burbuja. Se agregó en todos los casos colorante vegetal rojo en la cámara de agua. En el fondo lateral se pegó un trozo de papel negro para mejorar la visibilidad al momento de fotografiar las burbujas en movimiento.



Figura 3.8, Vista lateral de la caja de viento

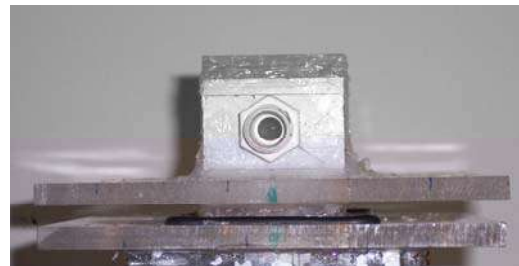


Figura 3.9, Vista frontal de la caja de viento

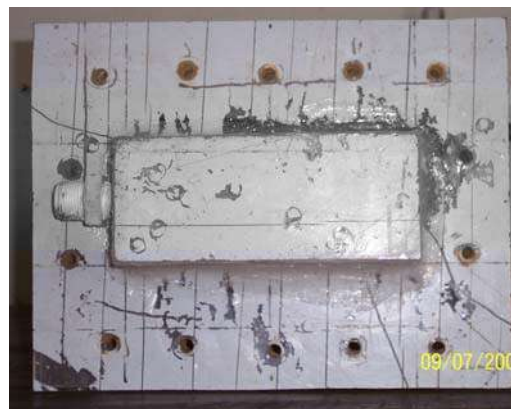


Figura 3.10, Vista en planta de la caja de viento

Debido a que la cortina presentó algunos problemas que en el capítulo de los resultados se explicarán con más detalle, se construyó otro prototipo.

El prototipo siguiente tiene una nueva configuración en la geometría de la caja de viento.

3.1.3.- Tercer prototipo usando lona sintética y acrílico.

Al nuevo diseño se le adaptó una sección en forma de una tobera. En un ducto en forma de escuadra se ubicó la alimentación. El número de capas de lona se aumentaron a veinte; sujetos por dos marcos de acrílico. El diámetro para la entrada de aire fue de 1.3 cm y el claro de la descarga de 11.5 cm. La altura total de la caja de viento fue de 15.1 cm.

Pero primero, se construyó el modelo en cartoncillo como se muestra en las figuras 3.11a y 3.11b para valorar su forma y el grado de complejidad para su construcción y posteriormente se construyó en acrílico de 0.9 cm de espesor.



Figura 3.11a, Diversas vistas de la caja de viento



Figura 3.11b, Diversas vistas de la caja de viento

Realizando algunos ajustes, el prototipo quedó como se muestra en la figura 3.12.



Figura 3.12, Caja de viento en acrílico

En todos los prototipos se realizó análisis de imágenes empleando el programa comercial Sigma Scan Pro[®] V. 5.0, para flujos de aire inferiores a los 2 l/min. y además se colocaron escalas de referencia por la parte exterior a lo largo y ancho de la cámara de agua.

En los primeros casos se adicionó colorante vegetal de color rojo para lograr una mejor visibilidad del fenómeno, durante la edición de las imágenes se empleó un paquete comercial de nombre Adobe PhotoShop[®]. Se prefirió seguir usando papel de fondo en la cámara de agua de color blanco recubierto con papel de color negro como se observa en la figura 3.13.



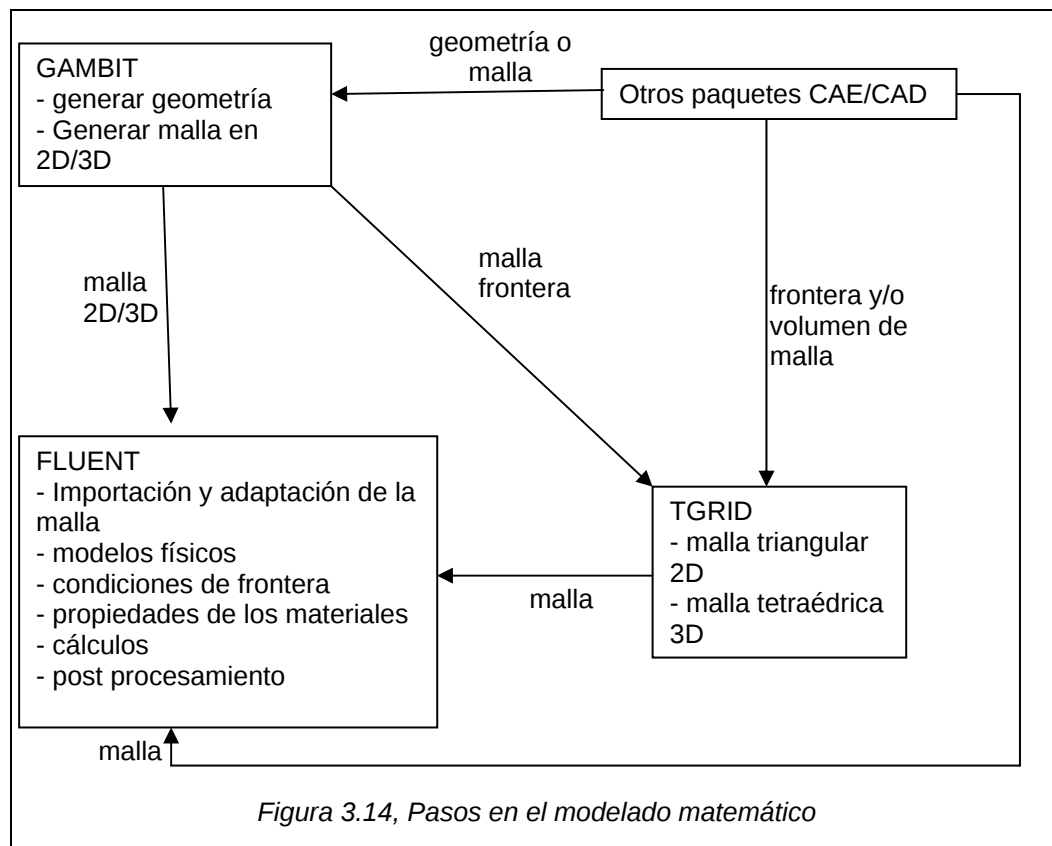
Figura 3.13, Burbujeador en operación

En el apartado siguiente, se describe el uso de una herramienta de gran validez y aceptación como una opción de vanguardia en el diseño y ubicación de dispositivos empleados en el área de aceración.

3.1.4.- Modelado matemático de los burbujeadores.

Se utilizó un paquete de simulación matemática (CFD), Fluent[®] versión 6.2.16, el cual incluye un programa para diseñar la geometría del o los dispositivos que se desean estudiar, Gambit[®] versión 2.2.30, la figura 3.15 muestra la apariencia del programa.

Para estudiar el comportamiento de un cierto sistema se debe de seguir el siguiente proceso que se indica en la figura 3.14.



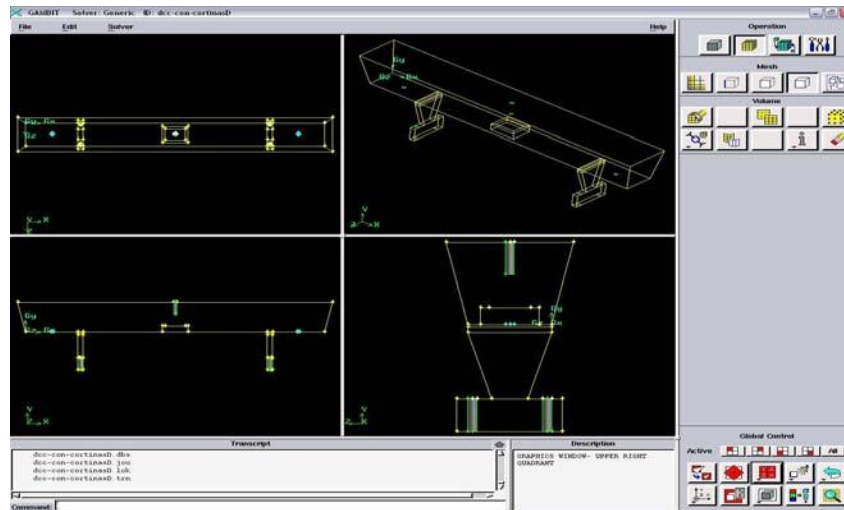


Figura 3.15, Ambiente del programa Gambit[®] donde se incluye el burbujeador propuesto

A continuación se describe el diagrama de la figura 3.14:

- Realizar el dibujo a escala en 2D y/o 3D, se puede hacer uso de otros programas de dibujo como AutoCad[®] o los de extensión CAE.
- Discretizar el sistema es decir, dividirlo en volúmenes pequeños o áreas pequeñas interconectados entre si para facilitar el mallado o las celdas por las cuales se da solución a una parte del sistema, ver figura 3.16. Cabe notar que entre más pequeñas sean las celdas más fino será el mallado, y los resultados serán más precisos e inversamente proporcional será el tiempo de cálculo y rendimiento del microprocesador de cualquier computadora. Para el caso de la caja de viento óptima se manejaron los parámetros de la tabla 3.I.

Tabla 3.I. Tamaño de la malla de la caja de viento

Celdas	Caras	Nodos	Particiones
93,240	290,358	104,144	1

- Finalmente, establecer las condiciones de frontera, como medios porosos, entradas salidas, paredes, etc.

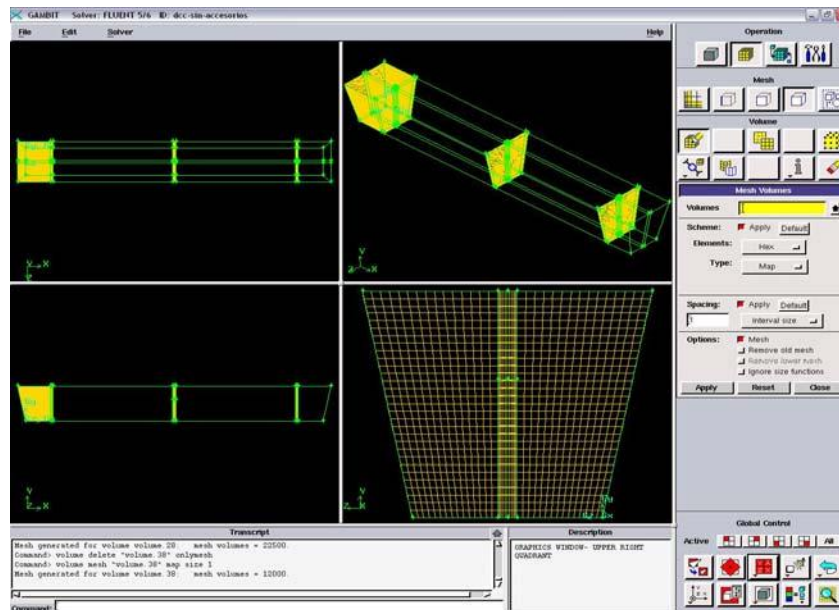


Figura 3.16, Ambiente en Gambit® del distribuidor

- Guardar y exportar la malla, ya que es el archivo que utilizará el paquete de simulación.

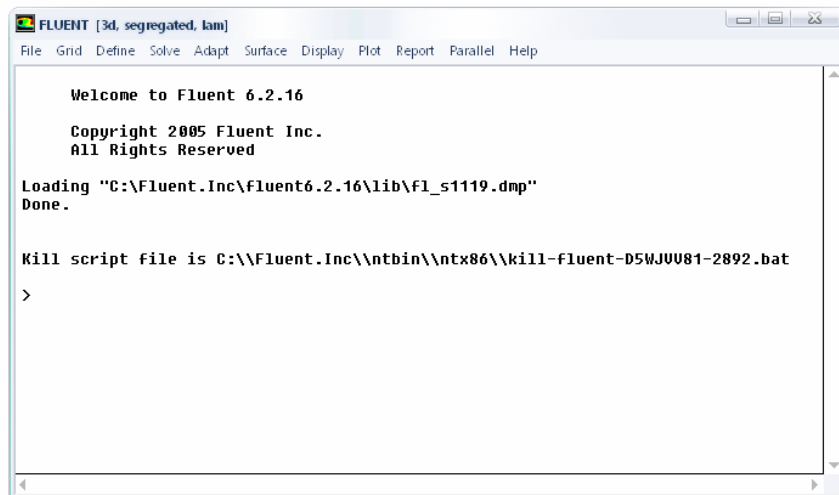


Figura 3.17, Ambiente del programa Fluent®

- Definir el o los fluido(s) de trabajo, las condiciones de operación para el sistema, el modelo a resolver; redefinir las condiciones de frontera y por último resolver el sistema.

La tabla 3.II muestra los parámetros utilizados en la convergencia de la caja de viento y en la figura 3.18 se muestra como Fluent® ofrece los resultados.

Tabla 3.II. Condiciones utilizadas en la convergencia de la caja de viento

Modelo	Materiales	Controles para solución	Inicio de solución	Número de iteraciones
Viscoso $\kappa - \varepsilon$	aire	Ec. de flujo y Ec. de turbulencia	Entradas	295

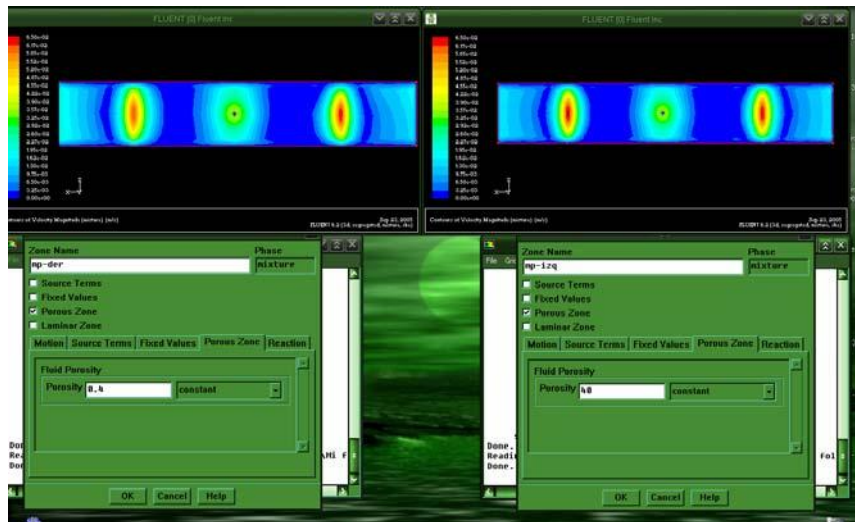


Figura 3.18, Resultados que presenta Fluent®

Se estudió el comportamiento del tercer prototipo y se rediseñó por completo la caja de viento dando como resultado, una geometría diferente a la presentada por el modelo físico anterior mostrado en la figura 3.12. De esta forma, se optimizó tiempo en el diseño de los burbujeadores, además de encontrar la ubicación adecuada de los mismos en el fondo del modelo a escala del distribuidor de colada continua y otros casos de estudio que se explicaran más adelante.

3.1.5.- Diseño óptimo del burbujeador en acrílico y lona sintética.

Gracias a la simulación matemática, se pudo determinar la forma final y construir la caja de viento cuyas dimensiones son las que se presentan en la figura 3.19.

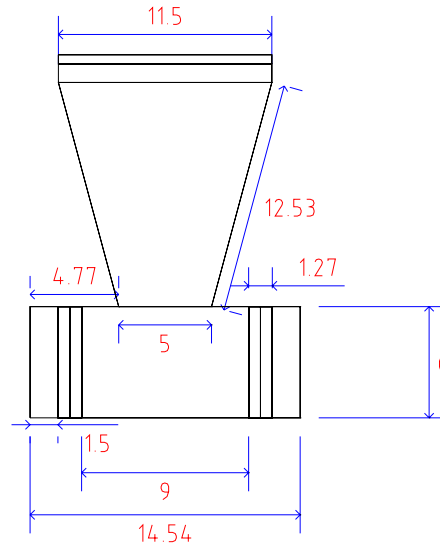


Figura 3.19, Dimensiones de la caja de viento

Donde las dimensiones están en centímetros. El ancho de la caja de viento es igual al del ancho de la cortina es decir 2.0 cm.

En el capítulo cuatro, se muestran todas las formas de diseño previas de la caja de viento antes de llegar a la forma anterior.

La caja de viento se construyó con acrílico de 0.6 cm de espesor, la figura 3.20 la muestra terminada.



Figura 3.20, Construcción en acrílico de las cajas de viento utilizadas

En cuanto a los medios porosos se hicieron algunas modificaciones basadas en la simulación matemática previa como: se utilizó lona sintética en un tanto de 20 capas montadas una sobre otra, sujetadas en un marco de acero inoxidable de 0.2 cm de

espesor. Selladas con VL – 2000[®], resina sintética y por último silicón para evitar fugas de aire por algún punto e infiltración de agua, principalmente en las esquinas.

La figura 3.21 muestra el medio poroso montado en la base del distribuidor modelo a escala obviamente también, el mismo medio poroso sujetando a la caja de viento.

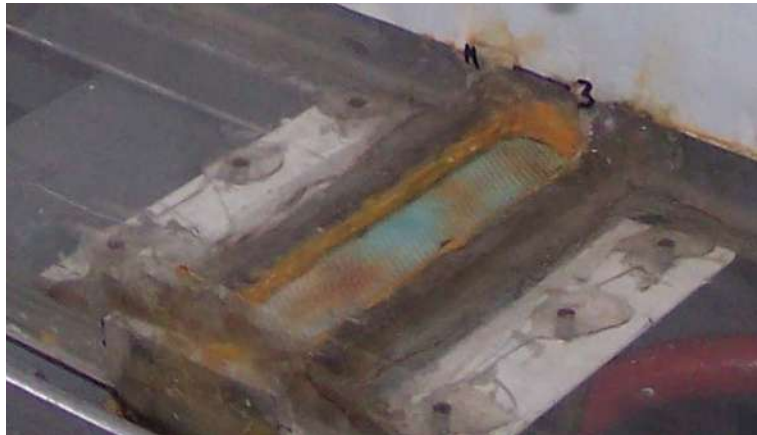


Figura 3.21, Vista en planta del medio poroso en el distribuidor

3.2.- Construcción a escala del modelo.

Como se plantea en los objetivos, el modelo que se construyó fue a escala 1:6 del prototipo del distribuidor de colada continua de 40 ton. de la planta Mittal Steel Co. ubicada en el puerto de Lázaro Cárdenas Michoacán, de cuyos planos se obtuvieron las dimensiones originales, como se puede constatar en las figuras 3.22a y 3.22b.

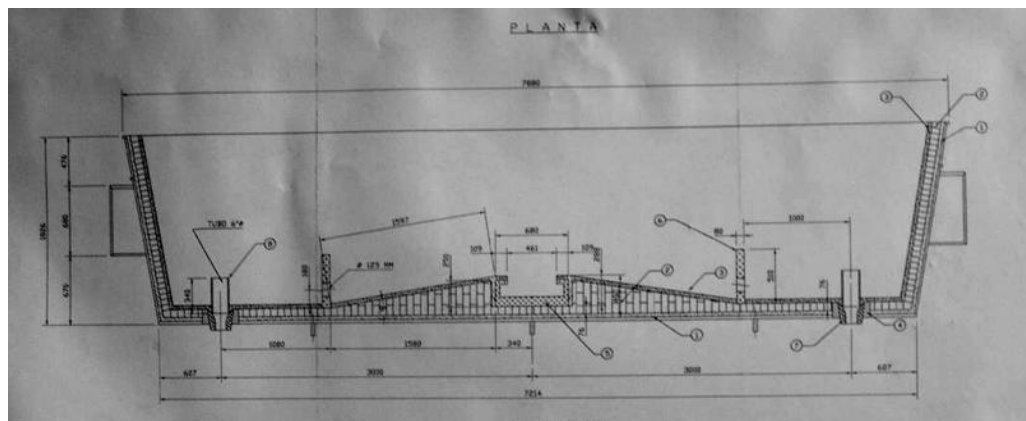


Figura 3.22a, Dimensiones del prototipo del distribuidor

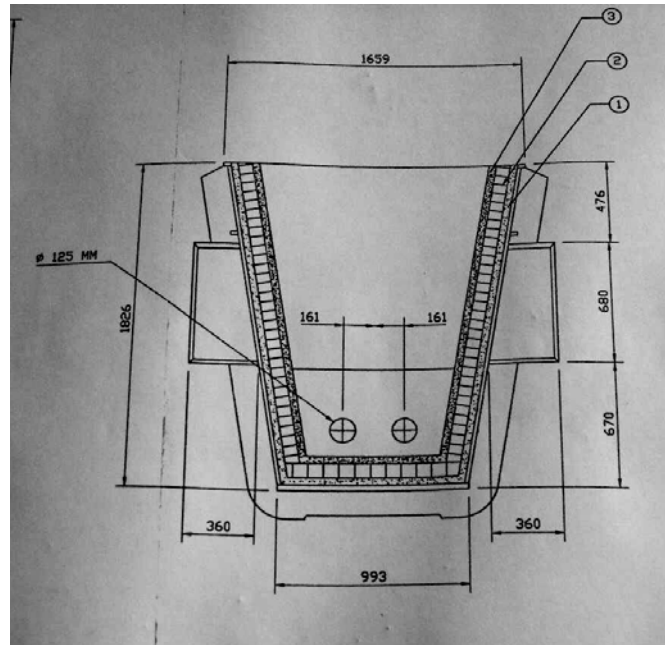


Figura 3.22b, Dimensiones del prototipo del distribuidor

Las dimensiones de los planos están en mm. El prototipo cuenta con aproximadamente 15.0 cm de espesor en material refractario.

Para la construcción del inhibidor de turbulencia y el distribuidor modelo de colada continua, incluyendo los orificios de alimentación y descarga se deben cumplir los criterios de similitud. La construcción del modelo a escala 1:6 está basada en el modelo de Froude, por consiguiente:

Llamaremos al subíndice p y m prototipo y modelo respectivamente.

$$Fr_m = Fr_p \quad (3.1)$$

Así

$$\frac{v_m^2}{gL_m} = \frac{v_p^2}{gL_p} \quad (3.1a)$$

ó

$$\frac{L_m}{L_p} = \frac{v_m^2}{v_p^2} \quad (3.1b)$$

Así se define el factor de longitud

$$L_f = \frac{L_m}{L_p} \quad (3.2)$$

$$v_f^2 = \frac{v_m^2}{v_p^2} \quad (3.3)$$

Por lo tanto

$$L_f = v_f^2 \quad (3.4)$$

Para un flujo gravitacional

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.5)$$

así la velocidad del fluido v , para el modelo y el prototipo puede ser representado por:

$$v_m^2 = 2gh_m \quad (3.6)$$

entonces el factor de velocidad es:

$$\frac{v_m^2}{v_p^2} = \frac{h_m}{h_p} \Rightarrow v_f^2 = h_f \quad (3.7)$$

así

$$L_f = h_f \quad (3.8)$$

Por lo tanto las alturas hidráulicas y las dimensiones lineales deben reducirse en la misma proporción.

El factor de escala de tiempo, t_f , lo representa la siguiente relación

$$t_f = \frac{L_f}{v_f} \quad (3.9)$$

lo que puede ser escrito en términos del factor de longitud

$$L_f = v_f^2 \Rightarrow v_f = \sqrt{L_f} \quad (3.10)$$

$$t_f = \frac{L_f}{\sqrt{L_f}} = \sqrt{L_f} \quad (3.11)$$

El factor de escala para la cantidad de flujo, puede derivarse de los factores de longitud y tiempo

$$\dot{Q}_f'' = \frac{L_f^3}{t_f} = \frac{L_f^3}{\sqrt{L_f}} \Rightarrow \dot{Q}_f'' = \sqrt{(L_f)^5} \quad (3.12)$$

En general el flujo Q_f a través de un área A se da por:

$$\dot{Q}'' = vA \Rightarrow \dot{Q}_m'' = v_m A_m \text{ y a su vez } \dot{Q}_p'' = v_p A_p \quad (3.13)$$

Ahora la ecuación en términos del diámetro del orificio queda:

$$\left(\frac{\dot{Q}_m''}{\dot{Q}_p''} \right) = \left(\frac{v_m}{v_p} \right) \left(\frac{d_m^2}{d_p^2} \right) \quad (3.14)$$

o en términos de los factores de escala

$$\dot{Q}_f'' = v_f d_f^2 \quad (3.15)$$

Por lo tanto

$$d_f^2 = \frac{\dot{Q}_f''}{v_f} = \frac{\sqrt{(L_f)^5}}{\sqrt{L_f}} = L_f^2 \quad (3.16)$$

Resultando

$$d_f = L_f \quad (3.17)$$

Esto indica, que el diámetro de las boquillas se debe reducir en la misma proporción que las dimensiones lineales.

$$L_m = \lambda \cdot L_p \quad (3.18)$$

$$v_m = \sqrt{\lambda} v_p \quad (3.19)$$

$$\dot{Q}_m'' = \sqrt{(\lambda)^5} \dot{Q}_p'' \quad (3.20)$$

3.2.1.- Modelo del distribuidor de colada continua.

El distribuidor modelo a escala se construyó en acrílico de 0.9 cm de espesor en la tabla 3.III se puede observar la relación que hay entre el prototipo y el modelo a escala 1:6. Se utilizó una resina como adherente y para reforzarlo se utilizaron tornillos de 1.9 cm de longitud. Enseguida se selló por dentro con resina sintética y silicón. Finalmente se diseñó y construyó una base de ángulo metálico con tornillos en las cuatro esquinas que sirven para controlar la inclinación (nivel). En tal base se montó el modelo del distribuidor y se compensó alguna inclinación indeseable.

Tabla 3.III. Dimensiones del modelo y prototipo

Parámetro	Modelo	Prototipo
Ancho del distribuidor (cm)	11.5	99.3
Largo del distribuidor en la base (cm)	115.2	721.4
Alto del distribuidor (cm)	27.9	182.6
Inclinación de las paredes	10.9°	10.9°
Flujo volumétrico (l/min)	5.417	477.675
Diámetro de la buza de alimentación (cm)	1.16	7.0
Diámetro de las buzas de descarga (cm)	1.16	7.0

No se debe olvidar que el prototipo del distribuidor contiene un determinado espesor de refractario. La manera como se determinó el flujo volumétrico se muestra a continuación.

Algunos de los siguientes datos se obtuvieron de un trabajo previo del molde de colada continua a escala 1:1^[55].

Velocidad de colada

$$v = 1.1 \text{ m/min}$$

Espesor del molde

$$T = 0.225 \text{ m}$$

Ancho del molde

$$W = 0.965 \text{ m}$$

Flujo Volmétrico

$$Q_p = T \cdot W \cdot V \quad (3.21)$$

Sustituyendo valores

$$Q_p = 0.225 \cdot 0.965 \cdot 1.1$$

$$Q_{pD} = 0.23884 \text{ m}^3/\text{min} \Rightarrow 238.8375 \text{ l/min} \Rightarrow 1.69 \text{ ton/min}$$

Este valor es para una buza de descarga y como tenemos 2, el doble del valor anterior es el valor del flujo de la alimentación al distribuidor prototipo.

$$Q_{pA} = 477.675 \text{ l/min} \Rightarrow 3.38 \text{ ton/min}$$

Donde A es la alimentación

El equivalente en litros de agua para el distribuidor modelo empleando la ec. 3.20 es:

$$\dot{Q}_m'' = \left(\frac{1}{6} \right)^{2.5} (477.675 \text{ l/min})$$

$$\dot{Q}_m'' = 5.4169 \text{ l/min}$$

De forma similar para el flujo de descarga su equivalente en agua es:

$$\dot{Q}_{mD}'' = \left(\frac{1}{6} \right)^{2.5} (238.8375 \text{ l/min})$$

$$\dot{Q}_{mD}'' = 2.7085 \text{ l/min}$$

Para el cálculo de la inclinación de las paredes no se presenta ninguna complicación ya que se utilizan las fórmulas simples de trigonometría.

Las figuras 3.23 – 3.26 muestran el distribuidor modelo.



Figura 3.23, Distribuidor modelo en acrílico

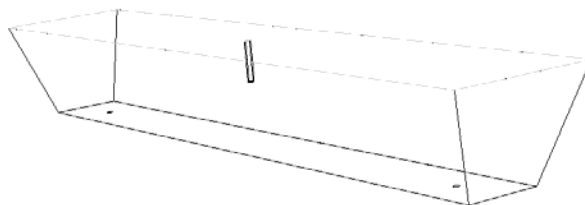


Figura 3.24, Geometría del distribuidor modelo



Figura 3.25 Vista lateral del distribuidor modelo



Figura 3.26, Vista en planta del distribuidor modelo

3.2.2.- Inhibidor de turbulencia.

Como parte fundamental del distribuidor, el inhibidor de turbulencia es un dispositivo controlador de flujo el cual se ubicó de manera temporal en el fondo y al centro del modelo del distribuidor con el fin de poderlo remover y realizar prácticas experimentales sin él. Se construyó también en acrílico y sus dimensiones son las que se muestran en la tabla 3.IV, así como en las figuras 3.27 – 3.30.

Tabla 3.IV. Dimensiones del inhibidor de turbulencia

Largo cm	Ancho cm	Alto cm	Labio cm	Apertura cm
10.1	8.1	3.6	1.2	7.7

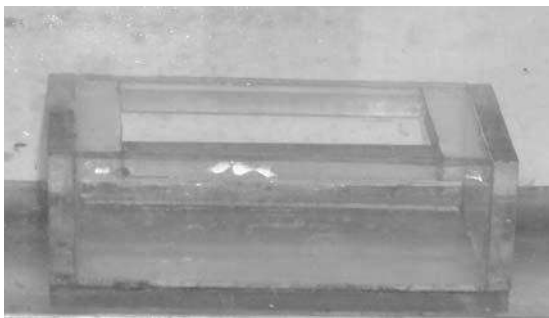


Figura 3.27, Inhibidor construido en acrílico

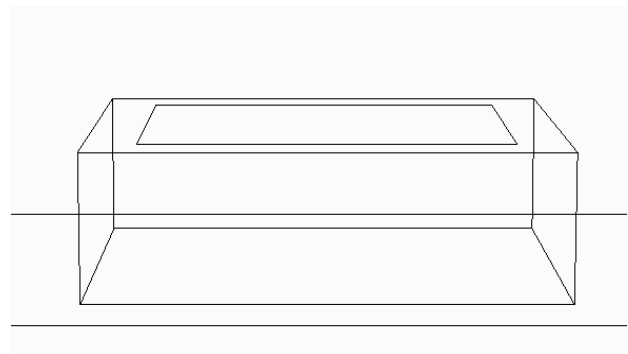


Figura 3.28, Geometría del inhibidor

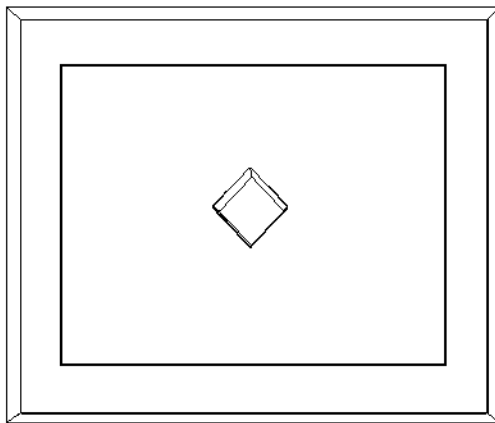


Figura 3.29, Vista en planta del inhibidor

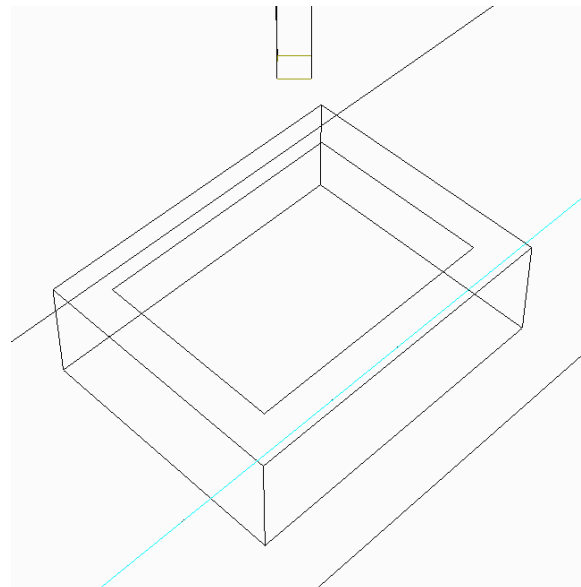


Figura 3.30 Isométrico del inhibidor

3.2.3.- Buzas de alimentación y descargas.

La buza de alimentación y las dos de descarga se construyeron a partir de un redondo de Nylamid, las cuales se maquinaron para lograr que el redondo fuera un tubo y presentara un diámetro interno equivalente según la similitud de escala de 1.16 cm. Además antes de la buza de alimentación se colocaron dos válvulas de esfera de cambio rápido, como se observa en la figura 3.31; para controlar el cambio de olla es decir, cambiar de agua fría a caliente según se requiera. Previamente a estas dos válvulas de esfera se colocaron dos válvulas de compuerta para tener un mayor control en el flujo de alimentación y en las descargas se colocan de igual forma dos válvulas de compuerta, a detalle se puede observar en las figuras 3.32 y 3.33. Debe indicarse que el diámetro interno de las tres buzas (alimentación y descargas) es idéntico.



Figura 3.31, Válvulas de alimentación



Figura 3.32, Válvula de descarga izquierda



Figura 3.33, Válvula de descarga derecha

3.3.- Cuantificación del volumen de agua equivalente al volumen de acero.

El volumen de agua que utilizó el modelo representa el volumen de acero que maneja el prototipo. La tabla 3.V muestra algunas propiedades del acero, las cuales nos servirán para encontrar la equivalencia.

Tabla 3.V. Propiedades físicas del acero

Propiedad	Acero (1600 °C)
Viscosidad (cP)	6.4
Densidad (g / cm ³)	7.08
Viscosidad cinemática (cs)	0.904
Tensión superficial (mN / m)	1900

Por medio de la siguiente relación se cuantificó el volumen.

$$V = \frac{P_s}{\rho_s} \lambda^3 \quad (3.22)$$

$$V = \frac{40000 \text{ kg}}{7.08 \text{ kg/l}} \left(\frac{1}{6} \right)^3$$

$$V = 26.16 \text{ litros}$$

Tal cantidad ayudó a continuar en la simulación matemática para encontrar la ubicación más adecuada de los burbujeadores. Además se determinó la altura del líquido en el modelo que fue 15.2 cm, que ayudó para el control del nivel del fluido, en la figura 3.34 se distingue por la marca con el 0.

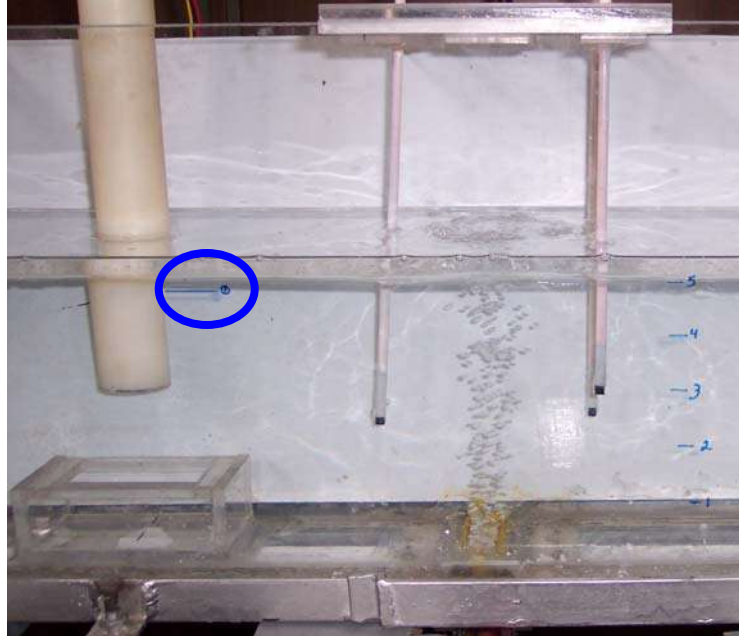


Figura 3.34, Altura del fluido en el distribuidor

3.4.- Estratificación térmica para el criterio de similitud.

Partiendo de las siguientes ecuaciones

$$Gr = \frac{\bar{\rho}^2 \bar{\beta} g L^3 \Delta T}{\mu^2} \quad (3.23)$$

$$Re = \frac{Lv\rho}{\mu} \quad (3.24)$$

$$Tu = \frac{Gr}{Re^2} \quad (3.25)$$

Relacionando ambas ecuaciones, tenemos:

$$Tu = \frac{\frac{\rho^2 \beta L^3 \Delta T}{\mu^2}}{\left(\frac{LU\rho}{\mu} \right)^2}$$

Simplificacando, resulta

$$Tu = \frac{\beta L \Delta T}{v^2} \quad (0.1)$$

Según los criterios de similitud, se debe cumplir que

$$Tu_m = Tu_p \quad (0.2)$$

por lo tanto

$$Tu_m = \frac{\beta_m L_m \Delta T}{v_m^2} = \frac{\beta_p L_p \Delta T}{v_p^2} = Tu_p$$

Reduciendo términos en la ecuación

$$\beta_m \Delta T = \beta_p \Delta T$$

El modelo utiliza agua como fluido de trabajo y el prototipo acero

$$\beta_w \Delta T_w = \beta_s \Delta T_s \quad (0.3)$$

Finalmente

$$\Delta T_w = \frac{\beta_s}{\beta_w} \Delta T_s \quad (0.4)$$

Durante la transferencia de calor, cuando la energía que está almacenada en los enlaces atómicos de las moléculas se incrementa, también sufre un incremento en su longitud el enlace de tal molécula generando expansión en respuesta a un calentamiento o contracción si es un enfriamiento. La respuesta al calentamiento o enfriamiento se denomina expansión térmica.

El coeficiente de expansión térmica se usa en dos casos diferentes.

- Como un coeficiente volumétrico de expansión térmica $(\beta)^{[41]}$.
- Como coeficiente lineal de expansión térmica $(\alpha)^{[41]}$.

Ambas características están estrechamente relacionadas. El coeficiente de expansión volumétrica puede ser medido para todas las sustancias o matrices condensadas (estado sólido y líquido). El coeficiente de expansión térmica lineal puede únicamente ser medido en estado sólido y es común en aplicaciones de ingeniería ^[42].

El coeficiente volumétrico de expansión térmica es una propiedad termodinámica de una sustancia dada por ^[43 - 47].

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{\rho}{m} \left(\frac{\partial V}{\partial \rho} \right)_P \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P = \frac{\rho}{m} \left(-\frac{m}{\rho^2} \right)_P = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad (0.5)$$

El coeficiente volumétrico de expansión térmica se calcula como sigue:

Para el acero la densidad es:

$$\rho_s = 7010 - 0.833(T - 1808)$$

$$T \Rightarrow K$$

Reacomodando el polinomio tenemos:

$$\rho_s = 8516.064 - 0.833T$$

Sustituyendo en la siguiente ecuación

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P$$

$$\beta_s = -\frac{1}{8516.064 - 0.833T} \left(\frac{\partial (8516.064 - 0.833T)}{\partial T} \right)_P$$

Derivando

$$\beta_s = -\frac{1}{8516.064 - 0.833T} (-0.833)$$

$$\beta_s = \frac{0.833}{8516.064 - 0.833T}$$

Para una temperatura de colada de 1903.15 K, resulta:

$$\beta_s = \frac{0.833}{8516.064 - (0.833 \cdot 1903.15 K)}$$

$$\beta_s = 1.202 \times 10^{-4} K^{-1}$$

Para el agua la densidad es:

$$\rho_w = 747.35 + 1.9381 T - 0.0037 T^2 \quad [48]$$

Sustituyendo en β

$$\beta_w = - \frac{1}{747.35 + 1.9381 T - 0.0037 T^2} \left(\frac{\partial (747.35 + 1.9381 T - 0.0037 T^2)}{\partial T} \right)_P$$

Derivando

$$\beta_w = - \frac{1}{747.35 + 1.9381 T - 0.0037 T^2} (-0.0074 T + 1.9381)$$

$$\beta_w = \frac{0.0074 T - 1.9391}{747.35 + 1.9381 T - 0.0037 T^2}$$

La temperatura a la que se trabajó el agua fue 296.15 K, resultando

$$\beta_w = \frac{(0.0074 \cdot 296.15 K) - 1.9391}{747.35 + (1.9381 \cdot 296.15 K) - (0.0037 \cdot 296.15^2 K^2)}$$

$$\beta_w = 4.027 \times 10^{-4} K^{-1}$$

Por último el $\Delta T_s = 30^\circ C$

$$\Delta T_w = \frac{1.202 \times 10^{-4} K}{4.027 \times 10^{-4} K} \cdot 30^\circ C$$

$$\Delta T_w = 8.955^\circ C \approx 9^\circ C$$

Por tal razón, la temperatura del agua que se alimentará al sistema será:

$$\Delta T_w = T_F - T_I$$

$$9\text{ }^{\circ}\text{C} = T_{fw} - 23\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{FW} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$$

La figura 3.35 muestra algunos valores para calcular el coeficiente volumétrico de expansión térmica, en la cual se puede observar que el valor para el agua a 20 °C no difiere notablemente al valor calculado con la ecuación 3.30.

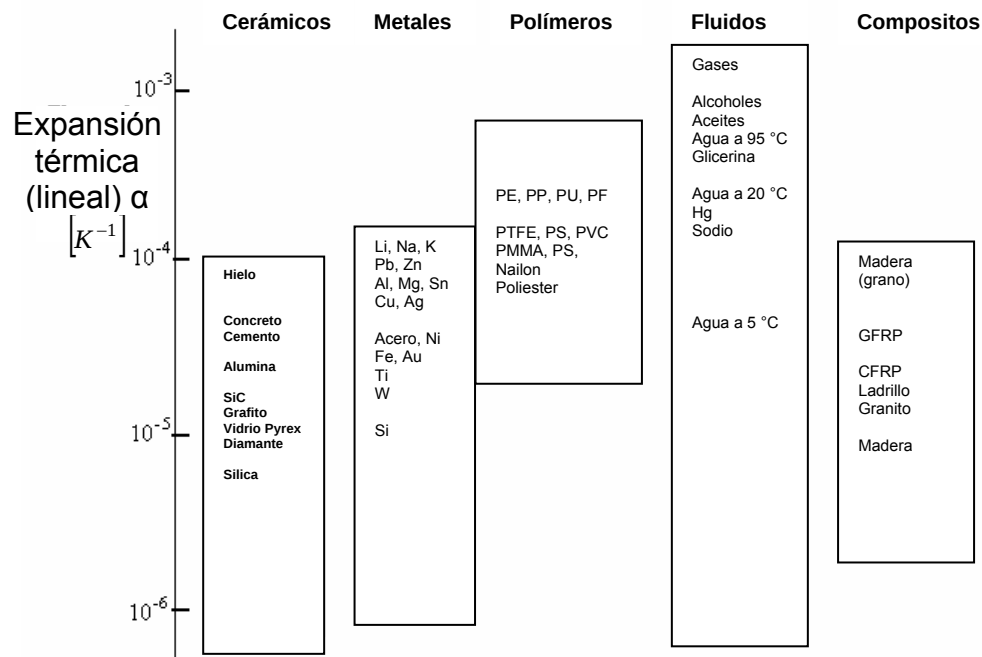


Figura 3.35, Coeficientes de expansión térmica de algunos materiales^[42]

3.5.- Ubicación y ensamble del suministro de agua fría, caliente y descargas.

Una vez conocido el escalón térmico se comenzó a adquirir el equipo necesario; donde por una parte se requiere de agua caliente, un recipiente que la contenga y un equipo de calentamiento que suministre el flujo calculado anteriormente durante todo el tiempo de experimentación.

Se instaló un contenedor de 1200 litros, el cual proporciona el agua necesaria para las prácticas planeadas por un día. Para el calentamiento, se utilizó un calentador de agua

de paso de 17.0 l/m de doble quemador, automático y para contener el agua caliente se dispuso de un recipiente cilíndrico comercial de plástico de 120.0 litros, en el cual se controla el nivel de llenado por medio de un flotador. En todas las conexiones se utilizó tubería de cobre de 2.5 cm y 3.8 cm de diámetro, tales dispositivos se muestran en la figura 3.36 y 3.37.



Figura 3.36, De izquierda a derecha, contenedores de agua caliente y fría



Figura 3.37, Calentador de agua

El agua fría, se tomó directamente de la red de suministro principal, ésta se almacenó en un recipiente de plástico de capacidad similar al del agua caliente.

El modelo del distribuidor se colocó en un mueble de madera hecho a la medida del equipo, ver la figura 3.38; en la parte inferior en un espacio dispuesto para contener un recipiente de acrílico con el fin de recibir el agua de los experimentos y mandarla a un tanque cuadrado metálico acondicionado para tal fin, para su reutilización en experimentos posteriores. Se puede observar en las figuras 3.39 – 3.41.



Figura 3.38, Mueble en madera de pino



Figura 3.39, Equipo experimental



Figura 3.40, Recipiente metálico para el reciclaje del agua



Figura 3.41, Válvulas de alimentación al recipiente metálico

3.6.- Calibración de válvulas.

Se calibraron las válvulas para que pudieran operarse al flujo especificado mediante los criterios de similitud cinemática y dinámica. Se midió con recipientes de laboratorio de precisión como, matraces y probetas de diferentes capacidades, el volumen que se llenaría o en su defecto vaciaría, en un minuto de operación del equipo.

Se tuvieron diferencias en los tiempos y por ello no se lograba establecer la apertura de la compuerta de las válvulas debido a que se manipulaban manualmente. Se solucionó el problema al aumentar el volumen de agua alimentada y descargada y a su vez además se aumentó el tiempo de llenado y descarga disminuyendo el efecto de la presión hidrostática.

3.7.- Ubicación de los burbujeadores en el fondo del modelo del distribuidor.

Para ubicar los burbujeadores en el fondo del distribuidor se recurrió a la simulación matemática. Se estudiaron seis posiciones probables de la cuales se seleccionó la que presentó mejores resultados, que es la que en este trabajo se presenta.

Se utilizaron dos modelos matemáticos para la simulación del sistema, los cuales fueron el modelo $k - \varepsilon$ de dos ecuaciones y el modelo euleriano, en el apéndice dos se muestra el desarrollo de las ecuaciones que involucran.

Se llevaron a cabo dos simulaciones más, las cuáles no involucraban los burbujeadores, una con inhibidor de turbulencia y otra con el distribuidor vacío, es decir, sin dispositivos modificadores de flujo. En las figuras que van de la 3.42, A1 a la 3.47, F2 se muestran tales posiciones y en la tabla 3.VI se especifica la ubicación exacta de los burbujeadores.

A) Posición uno.

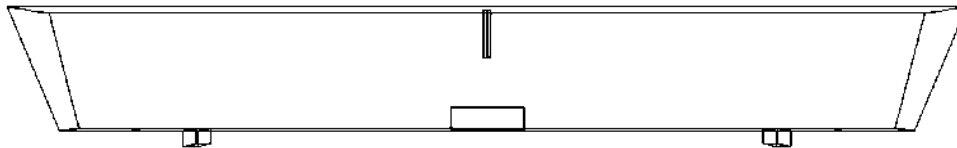


Figura 3.42, A1

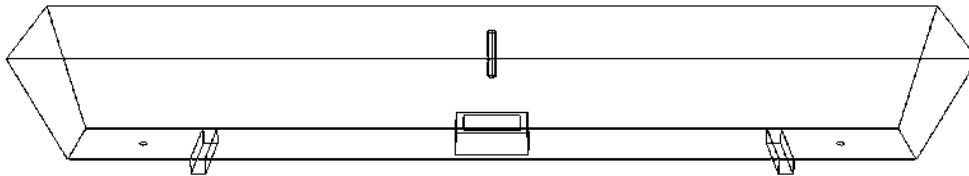


Figura 3.42, A2

B) Posición dos.

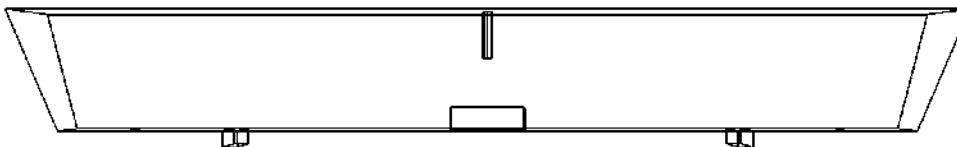


Figura 3.43, B1

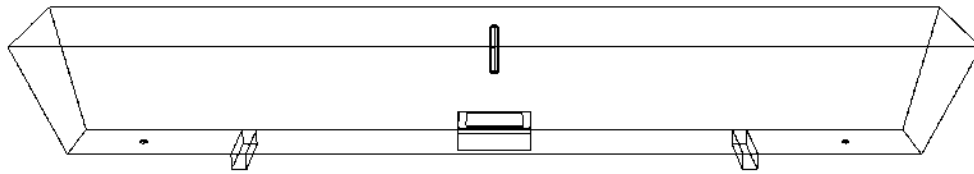


Figura 3.43, B2

C) Posición tres.

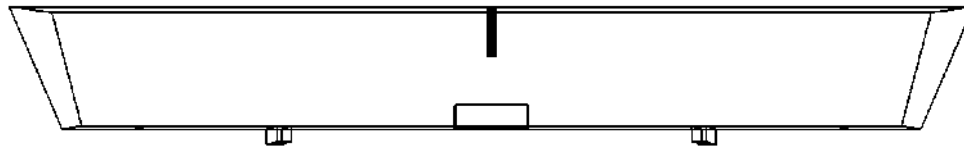


Figura 3.44, C1

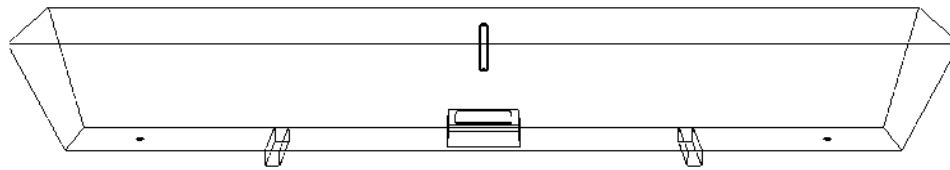


Figura 3.44, C2

D) Posición cuatro.

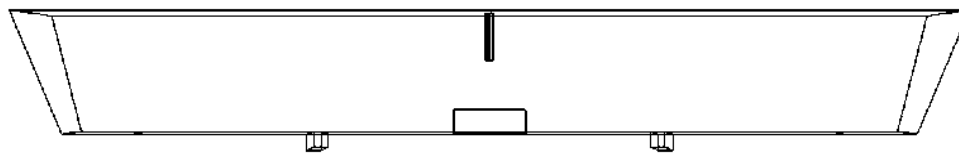


Figura 3.45, D1

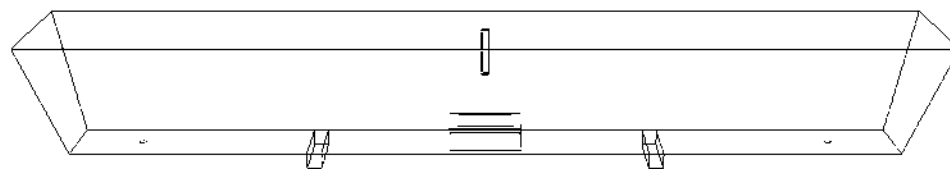


Figura 3.45, D2

E) Posición cinco.

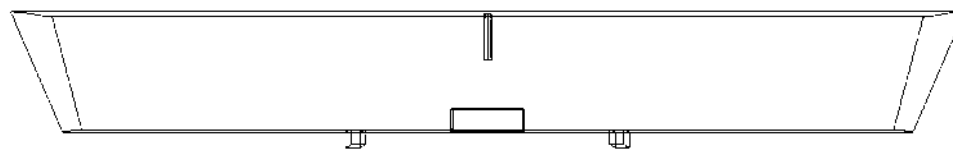


Figura 3.46, E1

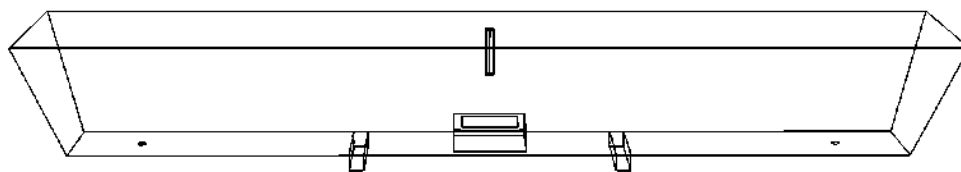


Figura 3.46, E2

F) Posición seis.

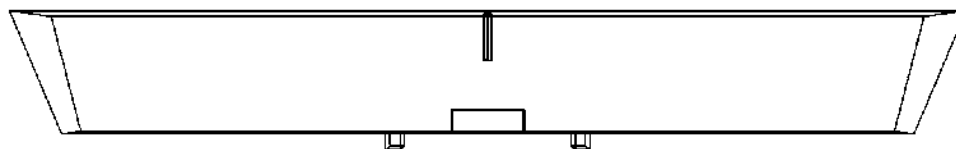


Figura 3.47, F1

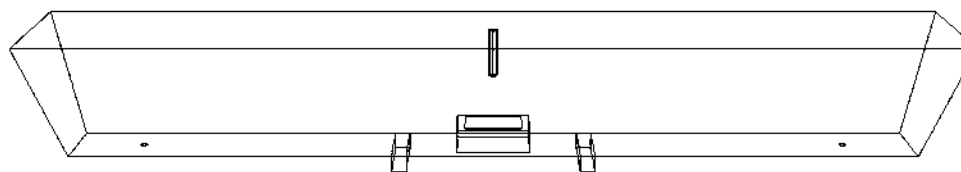


Figura 3.47, F2

G) Sin burbujeadores.

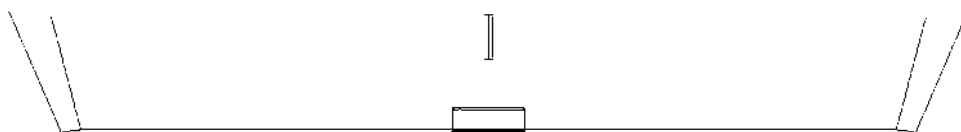


Figura 3.48 G1

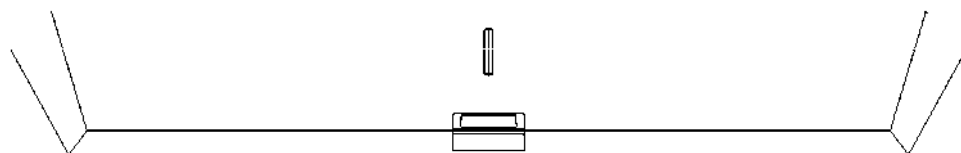


Figura 3.48, G2

H) Distribuidor vacío.

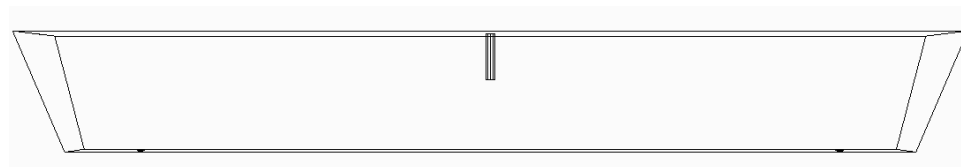


Figura 3.49, H1

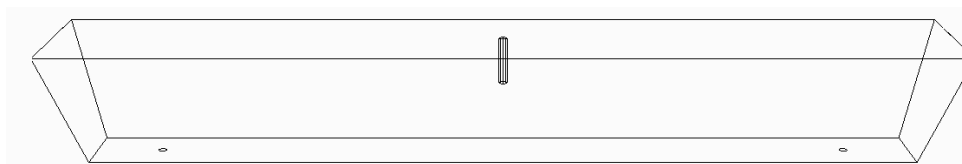


Figura 3.49 H2

Tabla 3.VI. Tamaño de malla del distribuidor y ubicación de los burbujeadores

Casos de estudio	Ubicación (cm)*		Celdas	Caras	Nodos
	Izquierda	derecha			
Posición 1	(16.6,0,0)	(98.5,0,0)	176,328	542,608	190,145
Posición 2	(22.0,0,0)	(93.1,0,0)	176,328	542,608	190,145
Posición 3	(27.5,0,0)	(87.7,0,0)	159,528	491,048	172,165
Posición 4	(32.9,0,0)	82.3,0,0)	167,928	516,828	181,155
Posición 5	(38.3,0,0)	76.8,0,0)	176,328	542,608	190,145
Posición 6	(43.8,0,0)	71.4,0,0)	176,328	542,608	190,145
Sin burbujeador			172,632	530,996	185,911
Vacío			259,492	795,476	276,782

* corresponde al punto exterior superior izquierdo y superior derecho del medio poroso a ambos lados de la buza de alimentación.

3.8.- Ensamble y calibración de los medidores de flujo de aire.

Los medidores de flujo se utilizaron para regular la cantidad de aire suministrado por el compresor hacía las cajas de viento, como se indica en figura 3.50. Cuenta con conexiones NTP de 0.318 cm de diámetro, manguera para aire la cual entra a presión y conexiones rápidas para manipular el equipo cuando necesitara de limpieza o permitir a la lona del medio poroso escurrir el exceso de agua después de la experimentación.

Los medidores de flujo se calibraron por medio de una técnica denominada *Desplazamiento de Líquido*, que consiste en llenar una probeta con 1000 ml de agua dentro de un recipiente con agua. Ya llena se voltea con la boca hacia abajo pero sin sacarla del agua y cuidando que no entre aire, se introduce la manguera con el aire medido con la perilla de control y se toma el tiempo que tarda en salir el agua de la probeta. Estos datos son ajustados a una línea recta por medio de la técnica de mínimos cuadrados.



Figura 3.50, Vista de los medidores de flujo y compresor de aire

3.9.- Ensamble y ubicación de los sensores de temperatura en la alimentación, dentro del modelo del distribuidor y en ambas descargas.

Se utilizaron, para medir la temperatura en el modelo, sensores denominados LM35 (circuitos integrados de gran precisión) donde la variación del voltaje de salida es linealmente proporcional a la variación de la temperatura y que al ser multiplicado por cien se obtiene directamente la temperatura en grados centígrados.

Se utilizaron siete de estos sensores para medir la temperatura, los cuales se ubicaron en forma estratégica, en la buza de alimentación del distribuidor, ver figura 3.51; antes y después de cada medio poroso, en cada buza de descarga, ver figura 3.52 y en la alimentación del tanque de agua caliente (AC), como se puede ver en la figura 3.53. Esta configuración permite monitorear la temperatura desde que se alimenta el agua al tanque AC, hasta que sale por las buzas de descarga.

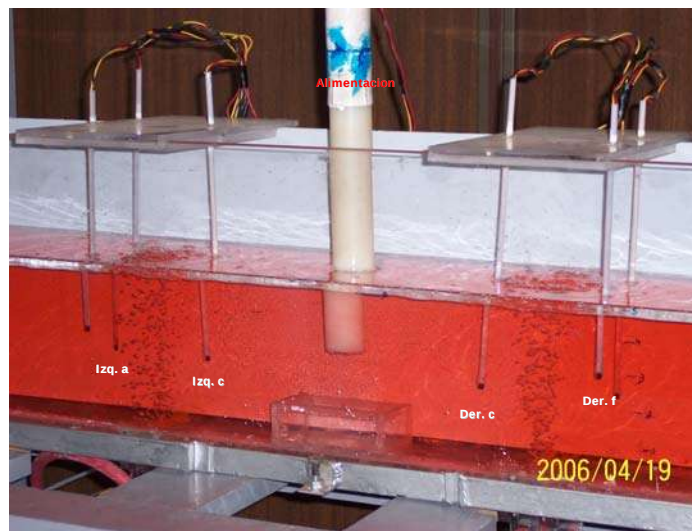


Figura 3.51, Ubicación de sensores en el baño de agua



Figura 3.52, Ubicación de sensores en las descargas



Figura 3.53, Ubicación de sensor en AC

Todos los sensores se montaron en tubos de plástico (popotes) de 0.5 cm de diámetro, se sellaron contra el agua para evitar un posible cortocircuito. En las figuras 3.54 y 3.55, así como en la tabla 3.VII, se muestran la ubicación de los sensores dentro del distribuidor.

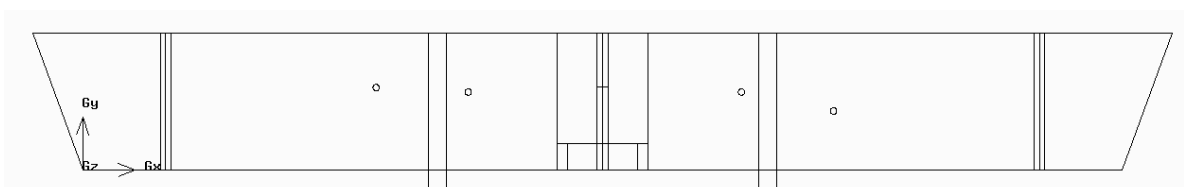


Figura 3.54, Vista lateral de la ubicación de sensores en el baño

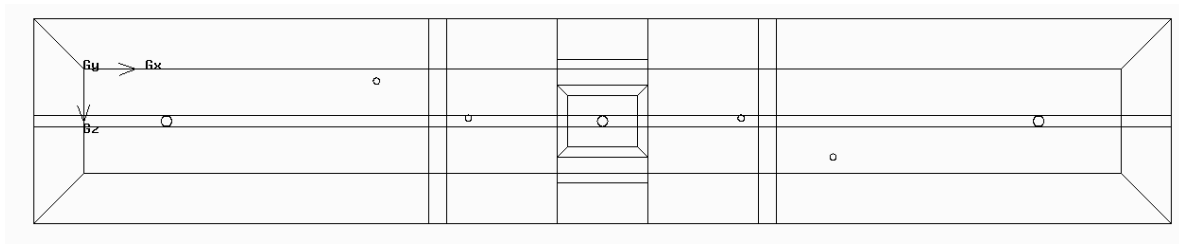


Figura 3.55, Vista en planta de la ubicación de sensores en el baño

Tabla 3.VII. Ubicación de los sensores en baño de agua

Sensor	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Der. C. (centro)	72.70	8.4	5.15
Der. F. (frente)	82.90	6.3	9.25
Izq. C. (frente)	42.45	8.4	5.15
Izq. A. (atrás)	32.25	8.9	1.05

3.10.- Validación de los sensores de temperatura.

Se realizaron algunas pruebas de validación de los LM35, para ello se hicieron mediciones alternas usando agua fría y caliente con un termómetro de mercurio dando como resultado una temperatura similar, por lo que se consideró en buen estado tanto el sensor como las conexiones soldadas con estaño en cada posición del sistema.

3.11.- Escoria.

Se simuló la capa de escoria protectora con 1.0 cm de espesor de parafina líquida comercial equivalente a 1.3 litros, además se realizó un corte en la pared posterior del distribuidor para recuperar por derrame la parafina y así poder reutilizarla y evitar contaminar el agua, ver figura 3.56.

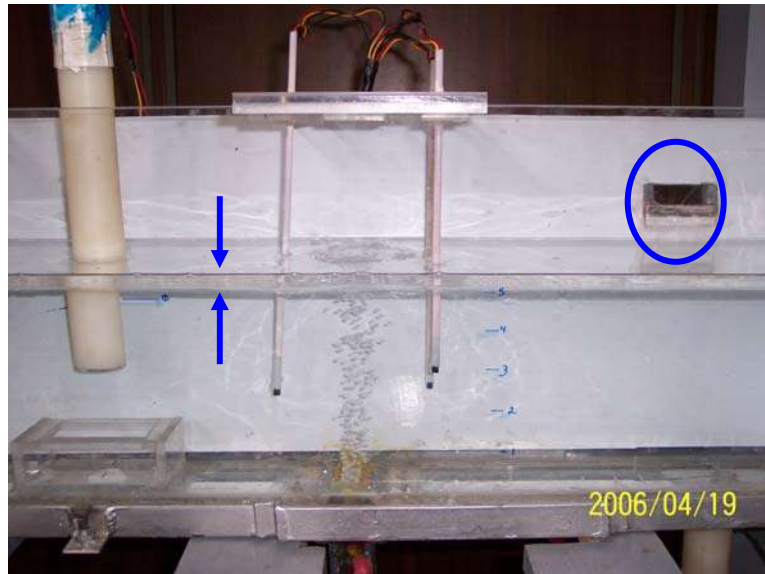


Figura 3.56, Capa de parafina líquida y orificio para su recuperación

3.12.- Sistema de adquisición de datos.

Se monitorearon los transductores con dos tarjetas de adquisición de datos NI USB 6008, con capacidad para 4 canales diferenciales (8 canales sencillos) para la conversión de señales de analógico a digital. Las tarjetas fueron conectadas a una computadora personal con procesador Pentium IV a 1.8 Mhz y 512 Mb en Ram.

Se hicieron mediciones a una velocidad de muestreo de tres por segundo. El tiempo total de cada experimento se fijó en diez minutos, de esta manera se tuvo un total de 1800 muestras por sensor.

3.12.1.- Tarjeta de adquisición de datos.

Se utilizaron dos tarjetas de adquisición de datos USB – 6008 a velocidad de USB 2 (12 *mB/s*) de 32 bits de resolución, su apariencia se muestra en la figura 3.57. Requieren de un voltaje de 4.10 *v* min y 5.25 *v* max. y una corriente de 500 mA max.

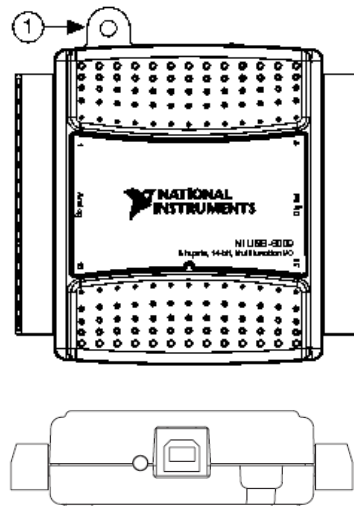


Figura 3.57, Tarjeta de adquisición de datos

3.12.2.- LM35.

Se utilizó el modelo TO – 92 con chaqueta de plástico, ver figura 3.58. Sus características son: calibrado en grados centígrados (Celsius), tiene un factor de escala lineal de $+10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, precisión de 0.5°C (para $+25^{\circ}\text{C}$), rango de trabajo de -55°C a 150°C , el voltaje de alimentación puede ser en un rango de 4V a 30V con una corriente de $60\text{ }\mu\text{A}$.



Figura 3.58, Vista inferior del LM35

3.12.3.- Fuente de poder.

Se conectaron los LM35 a una fuente de poder que suministra un voltaje de 5.0VCD . Tiene capacidad para conectar hasta ocho dispositivos. Se aislaron, tanto la fuente de poder como las tarjetas de adquisición en una jaula de Faraday para evitar ruido electrónico, como se muestra en las figuras 3.59 y 3.60.

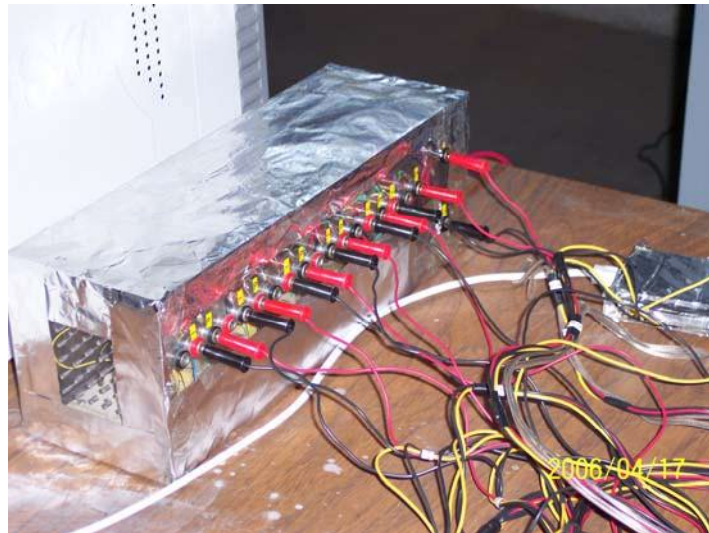


Figura 3.59, Fuente de poder de corriente eléctrica

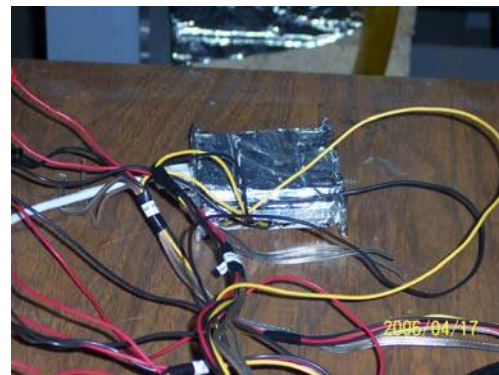
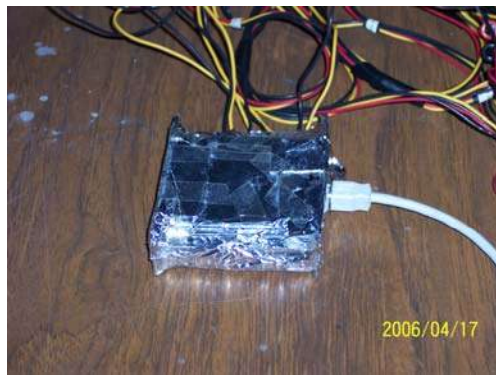


Figura 3.60, Tarjetas de adquisición de datos

3.12.4.- Programa para la fase de adquisición de datos.

Se desarrolló un programa específicamente para la fase de la digitalización de las señales de los transductores de temperatura. El programa se desarrolló en un ambiente de programación gráfica conocido como lenguaje G, basado en el concepto de instrumentación virtual a base de íconos. Este tipo de lenguaje, puede simular instrumentos reales como osciloscopios, multímetros, registradores, termómetros, etc. En las figuras 3.61 y 3.62 se muestran la apariencia del programa así como su estructura respectivamente.

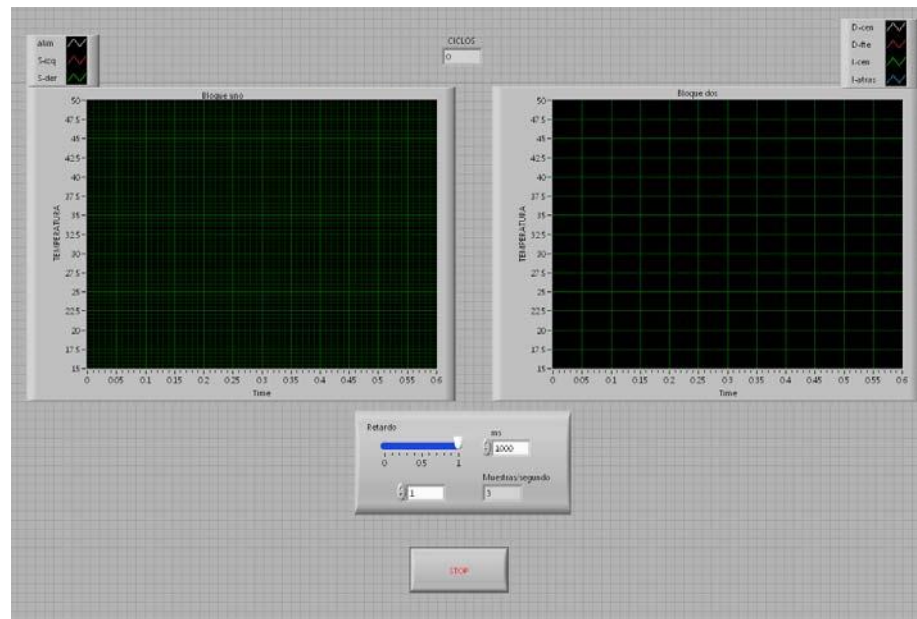


Figura 3.61, Pantalla del programa para la fase de adquisición de las señales de los LM35

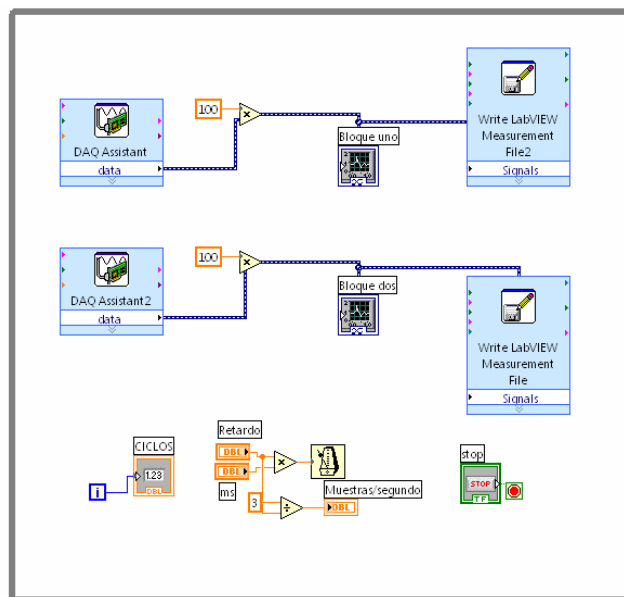


Figura 3.62, Estructura del programa

3.12.5.- Procesamiento de datos.

Para esta fase se escribió un programa que ordenan los datos obtenidos de la operación de conversión de las señales de analógico a digital de las tarjetas. Los datos se almacenan como archivos tipo ASCII (.txt). Estas señales se filtran para eliminar el posible ruido electrónico que hayan captado los sensores utilizados y las figuras 3.63 y 3.64 muestran su apariencia y estructura respectivamente.

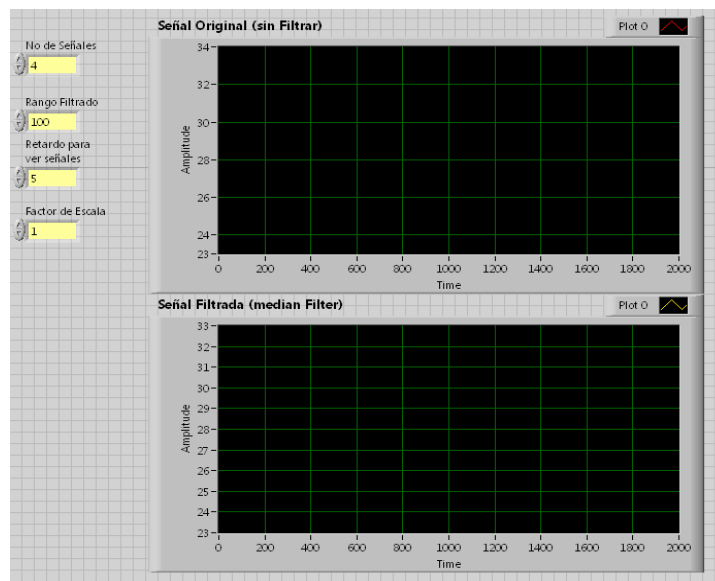


Figura 3.63, Pantalla del filtro

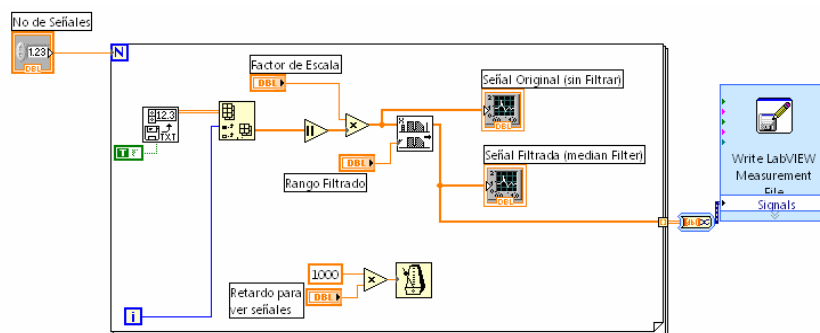


Figura 3.64, Estructura del programa

3.13.- Experimentos.

La disposición de los diversos equipos se muestra en las figuras 3.65 – 3.67.



Figura 3.65, Sistema de adquisición de datos, vista A

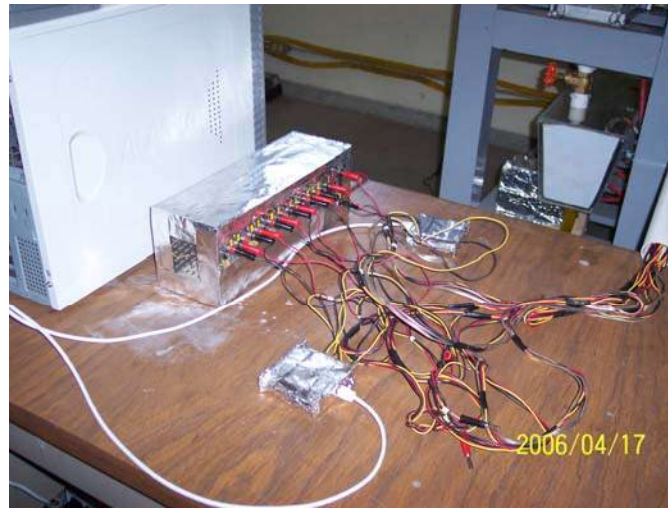


Figura 3.66, Sistema de adquisición de datos, vista B

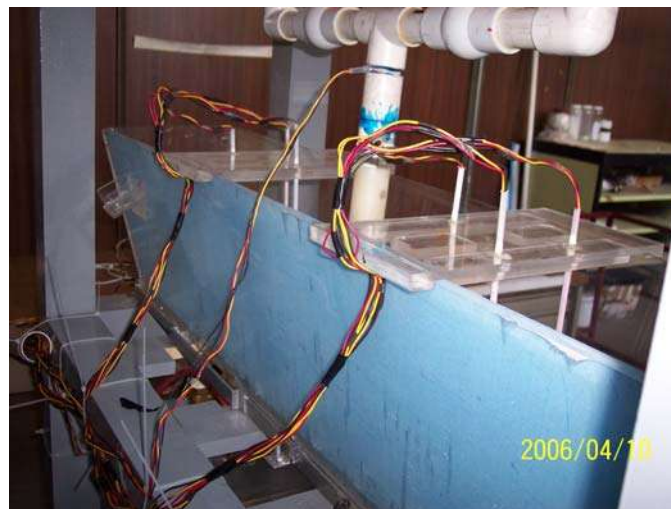


Figura 3.67, Conexiones de los LM35

En total y ya con el equipo a punto, se realizaron seis diferentes experimentos cada uno con tres replicas haciendo un total de dieciocho experimentos. En la tabla 3.VIII siguiente, se resumen las distintas configuraciones del sistema.

Tabla 3.VIII. Experimentos realizados

Experimento	Cambio de olla	Cortinas activas	Capa de escoria
T1	X		
T2	X	X	
T3	X	X	X
T4	X		X
Sin I. T.*	X		
Sin I. T.	X	X	

* Inhibidor de Turbulencia.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1.- Burbujeador, segundo prototipo, usando lona sintética y acrílico.

La figura 4.1 que a continuación se muestra se tomó de la cámara de agua en donde de manera preliminar se probaron los burbujeadores. Los resultados obtenidos con este tipo de burbujeador fueron muy interesantes pero desfavorables, ya que se obtuvo una cortina no homogénea y una considerable coalescencia de burbujas. Se realizaron algunas pruebas usando surfactante para observar el efecto sobre el diámetro y coalescencia de burbuja, pero en todos los casos de estudio siguientes se realizaron sin ningún agente modificador de la tensión superficial del agua.



Figura 4.1, Cámara de agua

4.2.- Burbujeador, tercer prototipo, usando lona sintética y acrílico.

En lo que se refiere al primer y segundo prototipo no se realizó análisis de imágenes debido a que se observó una gran coalescencia de burbujas. Por tanto este prototipo dio origen a burbujas que iban desde los 1.7 a 2.0 mm de diámetro, en contraste con las burbujas de diámetro mayor debido a la coalescencia de éstas y que se formaron a la salida de la lona sintética y justo en la pared del acrílico que sirvió de sujetador. Se observó además, que había burbujas de formas achatadas y alargadas en lugar de esféricas, lo que corresponde a lo que sigue:

- $0 < 0.1 \text{ cm}$ de diámetro Forma esférica
- $0 > 0.01 \text{ cm}$ de diámetro Desviación de la forma esférica ^[54]
- $0 > 0.1 \text{ cm}$ de diámetro Elipsoidal

Las graduaciones marcadas transversal y longitudinalmente en las paredes de acrílico de la cámara de agua, ver figura 4.2 y 4.3, tiene como función principal ser referencia y punto de validación de los datos obtenidos del analizador de imágenes. La separación entre marcas es de 2.5 mm.

Las burbujas sin coalescer presentan un diámetro de 0.9 mm mientras que las que coalecieron presentan un diámetro de 2.0 mm. Pero en forma general, la mayoría de las burbujas de la cámara de agua presentan coalescencia y en la gran mayoría se observa un diámetro aceptable. Por tanto se concluye que 20 capas de lona sintética fueron suficientes para obtener el diámetro de burbuja adecuado, que va de los 0.6 – 2.0 mm.

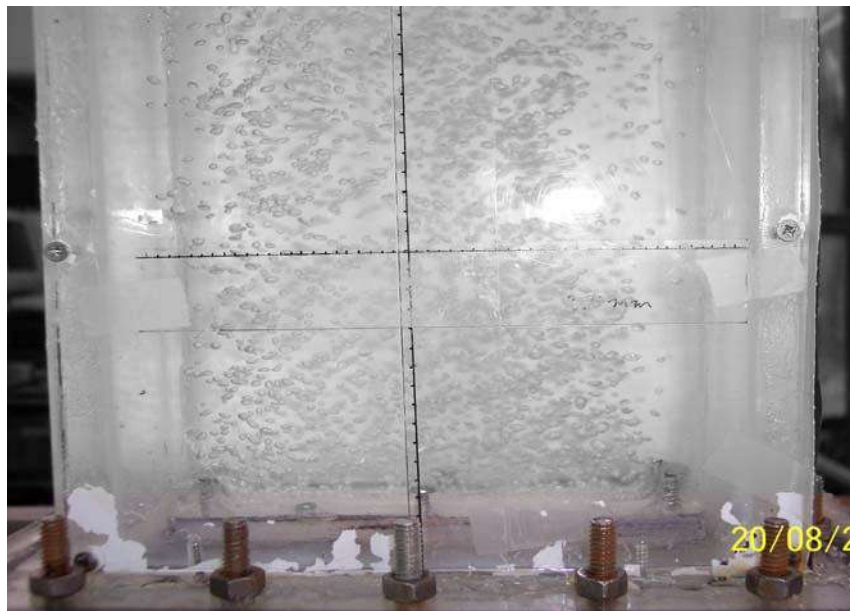


Figura 4.2, Vista lateral de la cámara de agua

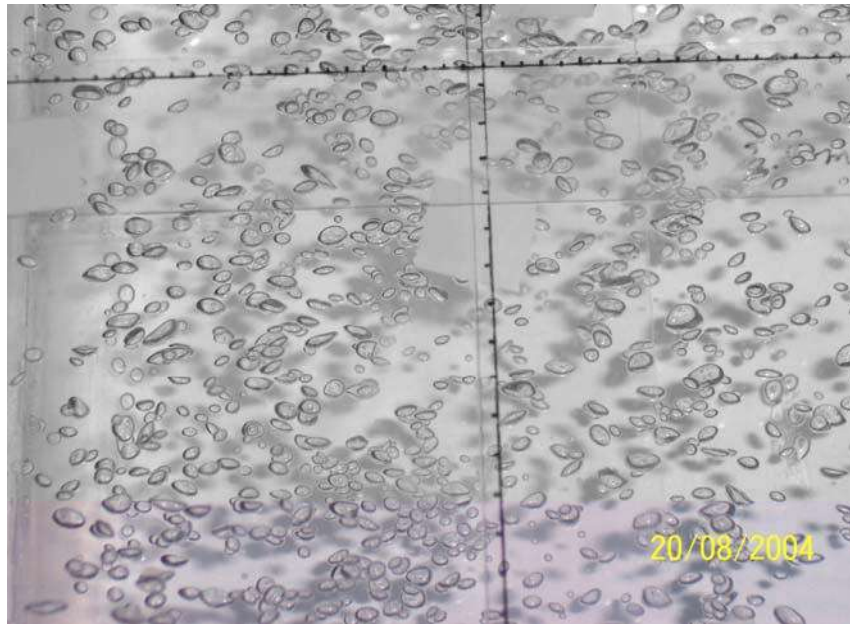


Figura 4.3, Porción de la cámara de agua

4.3.- Modelado matemático de los burbujeadores.

No se logró que la cortina de burbujas saliera uniforme del medio poroso, es decir, debido a la concentración de aire en algunos puntos específicos, en las esquinas principalmente, se formó un flujo de aire irregular que distaba mucho de parecer una cortina de burbujas. Se puede observar en la figura 4.4, que la forma geométrica de la caja de viento no es la mejor, ya que se observa una mayor velocidad y concentración de aire en una de las esquinas justo arriba de la alimentación de aire, sin olvidar el vórtice que se genera al extremo opuesto de ésta.

Una vez observado el comportamiento de la caja de viento del prototipo anterior, se dio a la tarea de encontrar la forma geométrica ideal para lograr una cortina uniforme. Para encontrar la caja de viento idónea se experimentó haciendo modificaciones en una serie de factores geométricos de la misma, factores como: longitud y ancho del conducto de alimentación, incorporación de mamparas o baffles, una alimentación adicional de aire, etc.

De las figuras que comprenden de la 4.4 – 4.15 se pudo predecir la forma final de la caja de viento óptima. A continuación se describirán cada una de las modificaciones realizadas a la configuración de la caja de viento.

En la figura 4.5 se puede observar que se adicionó un alargamiento en el conducto de alimentación, pero los resultados obtenidos son muy similares a los presentados en la figura 4.4 como acumulación de aire en la esquina superior izquierda.

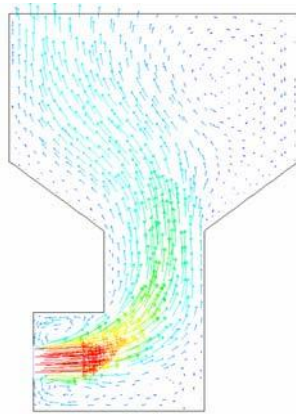


Figura 4.4, Comportamiento del tercer prototipo

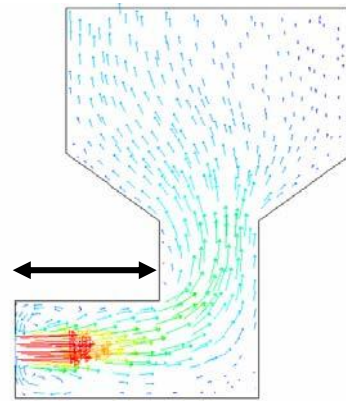


Figura 4.5, Alargamiento del conducto de alimentación del tercer prototipo

En lo correspondiente a la figura 4.6 se puede decir que se alargó 1 cm más el conducto de alimentación, incrementando con ello la concentración de aire en la esquina superior izquierda.

Al hacer más ancho el cuello de alimentación de la figura 4.5 se obtuvo el modelo que se muestra en la figura 4.7 y se puede constatar que la concentración de aire cambió de posición a la esquina superior derecha.

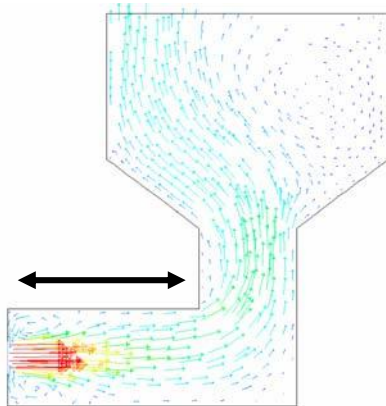


Figura 4.6, Alargamiento del conducto de alimentación

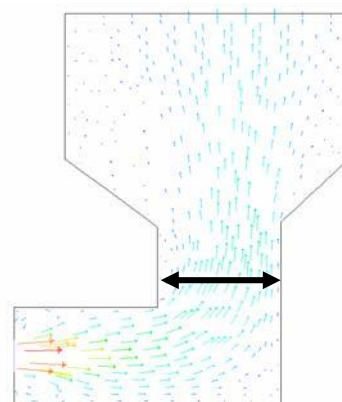


Figura 4.7, Ensanchamiento del conducto de alimentación

La última modificación que se realizó a este tipo de geometría se muestra en la figura 4.8, en donde se hizo más ancho el cuello posterior a la alimentación y se obtuvo una concentración de aire nuevamente en la esquina superior izquierda.

Como ninguna de las formas anteriores cubrió nuestros objetivos de diseño se cambió la forma geométrica. Es decir, a la figura 4.5 se le adicionó otra entrada dando origen a la figura 4.9 en la cual se observa que el aire se concentra en la esquina superior derecha.

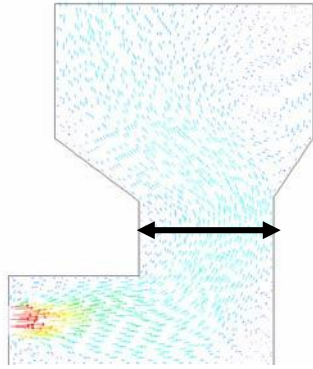


Figura 4.8, Ensanchamiento y alargamiento del conducto de alimentación

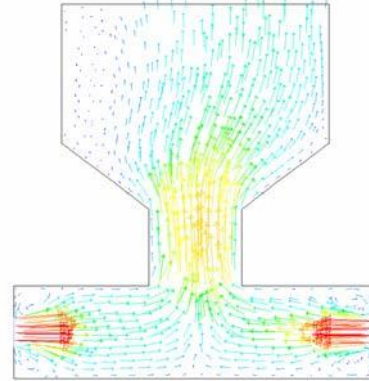


Figura 4.9, Doble conducto de alimentación

A la figura 4.9 se le adicionaron baffles dando lugar a la figura 4.10 en donde se puede observar una notable mejora; ahora la concentración de aire es en el centro de la salida, pero presenta un remolino a ambos lados del flujo principal.

Al ensanchar el cuello de la figura 4.10 obtenemos la figura 4.11 que muestra una reducción de los remolinos laterales y un aumento de concentración de aire en el centro de la salida.

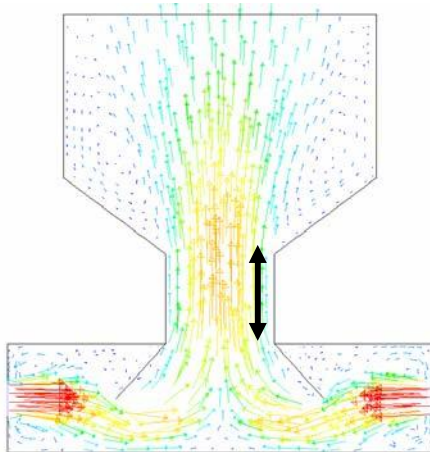


Figura 4.10, Doble conducto de alimentación con baffles

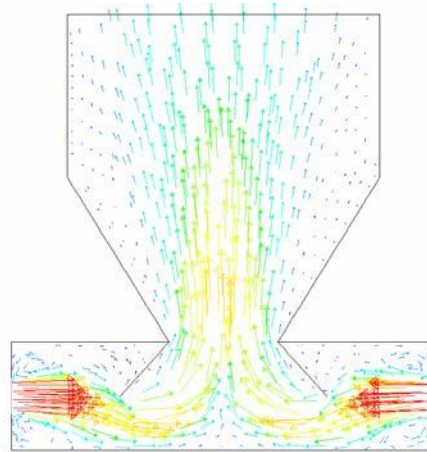


Figura 4.11, Ensanchamiento del cuello de la caja de viento

En las figura 4.12 – 4.14 sólo se modifico la longitud y el ángulo de posición de los baffles, se observa de forma gradual la llegada al diseño final. En todas las figuras mencionadas se concentra el aire en el centro de la salida.

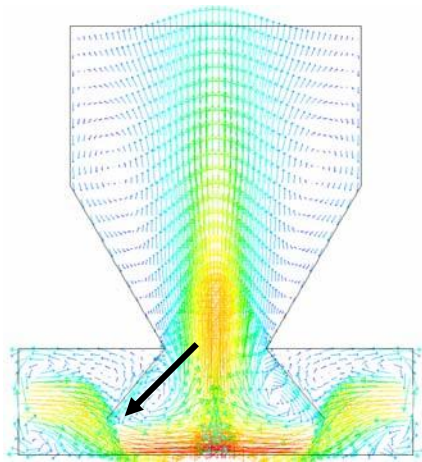


Figura 4.12, Alargamiento de baffles

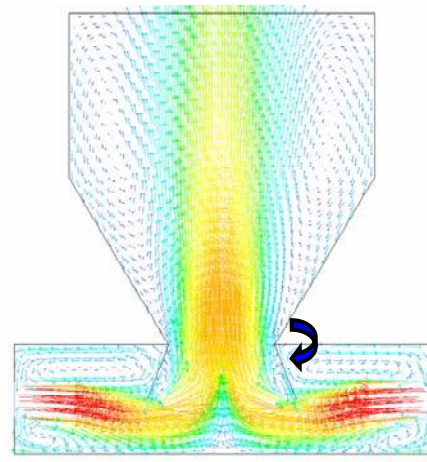


Figura 4.13, Cambio de ángulo de los baffles

Al modificar el ángulo de las paredes laterales del modelo que se muestra en la figura 4.12, se obtiene la figura 4.15 la cual muestra desventajas ya que se incrementa la concentración de aire en los remolinos laterales.

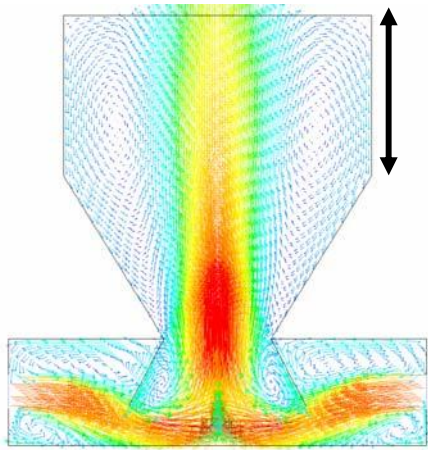


Figura 4.14, Alargamiento de baffles

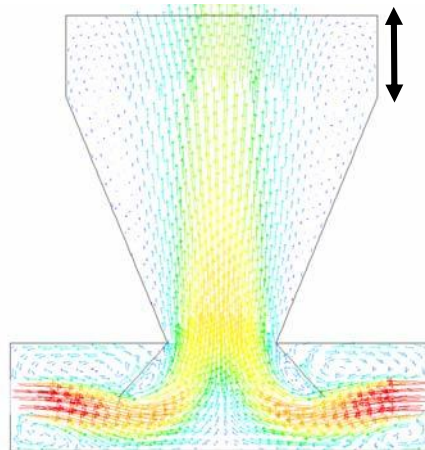


Figura 4.15, Ensanchamiento de la caja de viento

Al disminuir el ángulo de las paredes laterales del modelo de la figura 4.10 desde el conducto hasta la salida se obtienen la figura 4.16 que presenta una cortina de aire casi homogénea es decir, como se puede observar una concentración de aire casi igual en toda la superficie de salida.

Finalmente, se hace más ancho el conducto de alimentación, se retiran los baffles y se cambia la posición de la alimentación del modelo la figura 4.16 dando como resultante la figura 4.17, cuyo modelo es el que como se observa presenta una concentración más uniforme a la salida y por ello es el modelo óptimo a construir.

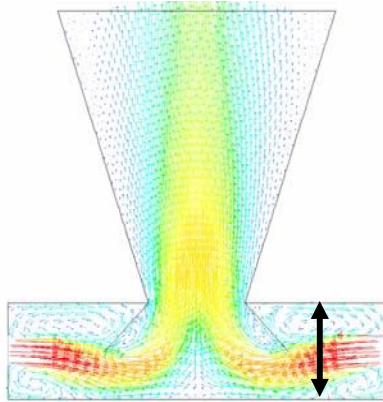


Figura 4.16, Caja de viento previa a la convergencia

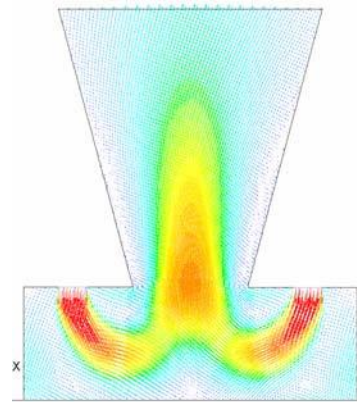


Figura 4.17, Cambio de ubicación de los conductos de alimentación

4.4.- Diseño óptimo de los burbujeadores.

Como muestra en la figura 4.18 se puede observar un flujo uniforme en todo el interior de la caja de viento lo que predice buenos resultados. La forma geométrica es totalmente distinta a la inicial construida en acrílico pero no es suficiente tal resultado ya que el medio poroso o más bien las veinte capas de lona sintética colocadas a la salida de la caja de viento generaran una barrera de oposición y un ΔP que pueden alterar la uniformidad de aire a la salida de la caja de viento.

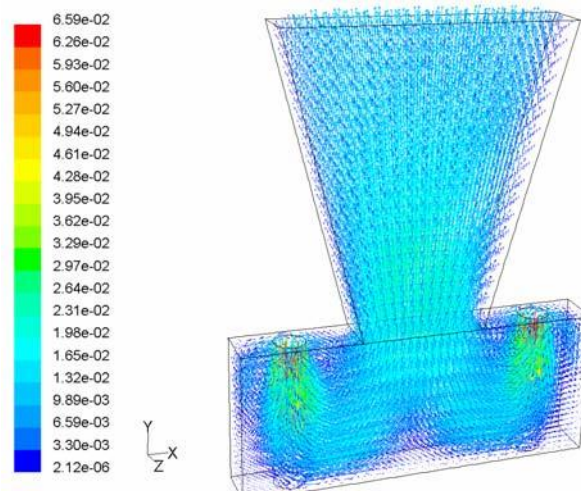


Figura 4.18, Vista en 3D de la caja de viento

En la figura 4.19 se coloca en el modelo matemático un medio poroso el cual tiene el mismo espesor (2 cm) que el paquete formado por las lonas, y se puede observar en la figura mencionada que la uniformidad de la cortina se mantiene invariante a lo largo de todo el medio poroso. Tal resultado brinda certeza y seguridad para continuar con la etapa de construcción en acrílico del diseño óptimo de la caja de viento y los medios porosos. No se observan cúmulos de burbujas en los marcos prensa que sujetan los medios porosos debido a que el espesor de tales marcos es de 2 mm.

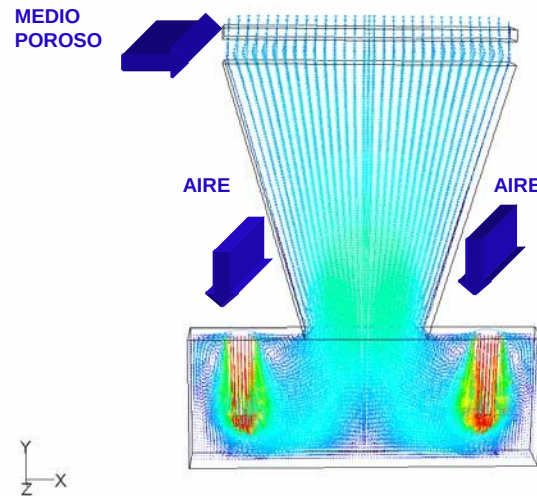


Figura 4.19, Vista de la caja de viento con medio poroso

4.5.- Ubicación de los burbujeadores en el fondo del distribuidor.

Se estudiaron seis posiciones, como ya se mencionó anteriormente, con la ayuda de la simulación matemática. Se seleccionó la posición cinco para las pruebas en el modelo físico, esta posición incluyendo las otras cinco restantes se estudiaron empleando dos modelos el $k - \varepsilon$ - mezclas y el Euleriano.

Las figuras 4.20 – 4.22 que corresponden a las posiciones uno – tres respectivamente se observa en tales posiciones, que hay flujo recirculatorio cerca de las salidas los cuales evitan que predomine el flujo de mezclado y homogeneidad en la temperatura y composición generando zonas frías y microestructuralmente diferentes. En cambio la figura 4.23 que corresponde a la posición cuatro en base a los resultados puede ser interesante su estudio ya que al igual que la posición cinco no presentan flujo de recirculación a las descargas.

En la figura 4.24, se puede observar que hay un aumento en las fuerzas de momento a la descarga del acero entre las cortinas y el inhibidor de turbulencia, debido al efecto de la cortina lo cual genera un buen flujo de mezclado a la entrada y promueve el flujo pistón a la salida. Se puede corroborar observando las isoclinas de velocidad de la figura 4.25, y los contornos de turbulencia de la figura 4.26. En todas las posiciones estudiadas mediante simulación matemática se omitió el efecto de la escoria.

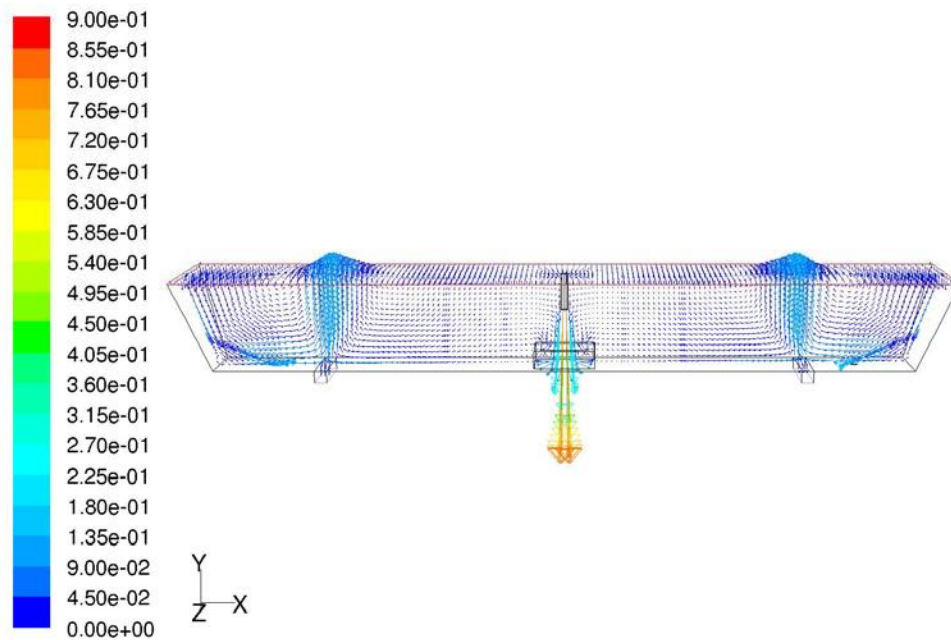
La figura 4.27 que corresponde a la posición seis muestra un alto mezclado en la zona que se comprende entre el inhibidor de turbulencia y las cortinas pero como se indicó en el párrafo anterior se estudió una posición de seis en el modelo físico.

Con los resultados del modelado matemático se cortó la base del distribuidor a la distancia correspondiente a la posición cinco y se realizaron con tal configuración todos los experimentos con los cuales se estudiaron el efecto térmico de las cortinas de burbujas de aire sobre el baño de agua líquida que simula las cortinas de burbujas de argón en el baño de acero líquido.

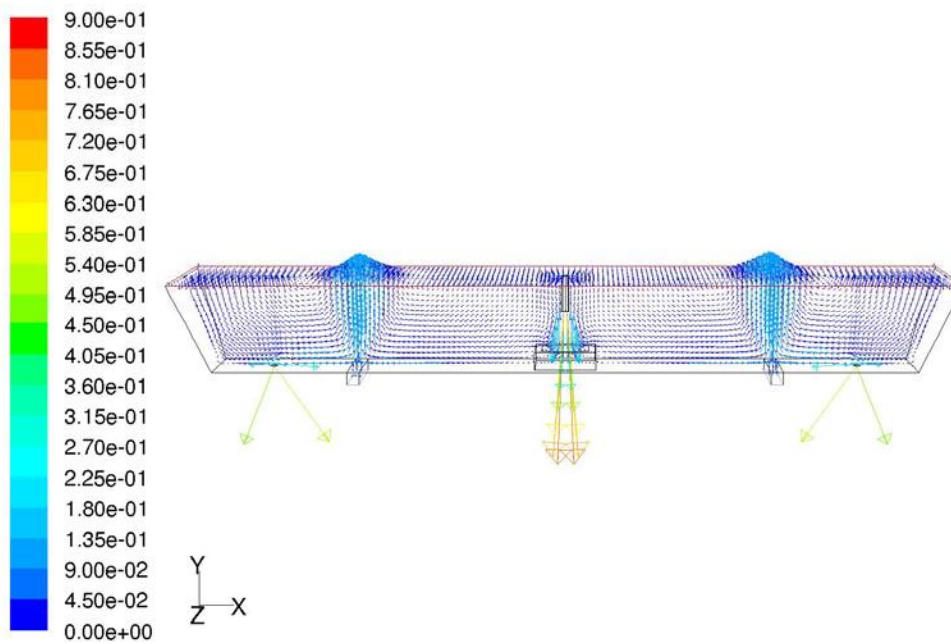
Las posiciones que tienen los burbujeadores más alejados de la alimentación se consideró que no son muy útiles ya que contribuyen a generar zonas de recirculación con movimiento muy lento y un bajo volumen de mezclado; generando zonas con diferentes temperaturas localizadas lo que aumenta el volumen de transición del acero. La turbulencia nos puede indicar la velocidad con que se mueve el acero en el distribuidor y por ello deducir el volumen de mezclado y obviamente las zonas más turbulentas se presentan antes de las cortinas en las áreas de mayor efecto del inhibidor de turbulencia y después de las cortinas hacia la superficie del baño, se recomienda observar la figura 4.26.

En la simulación matemática todas las posiciones estudiadas contaron solo con el medio poroso en vez de los burbujeadores completos, ya que estos se estudiaron de forma previa y con ello se obvia tiempo de simulación.

4.5.1.- Posición 1.

Figura 4.20, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor

4.5.2.- Posición 2.

Figura 4.21, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor

4.5.3.- Posición 3.

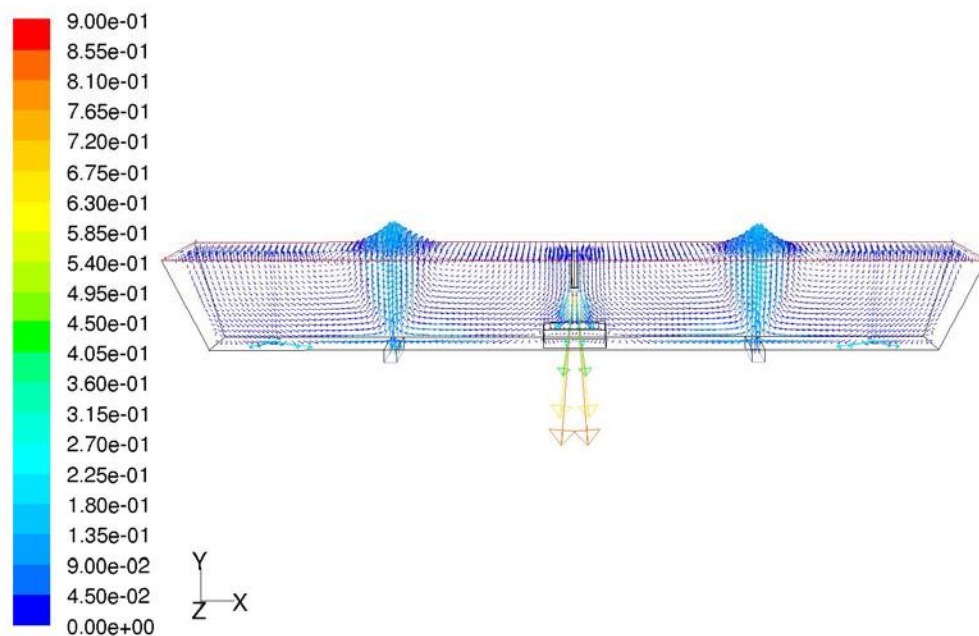


Figura 4.22, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor

4.5.4.- Posición 4.

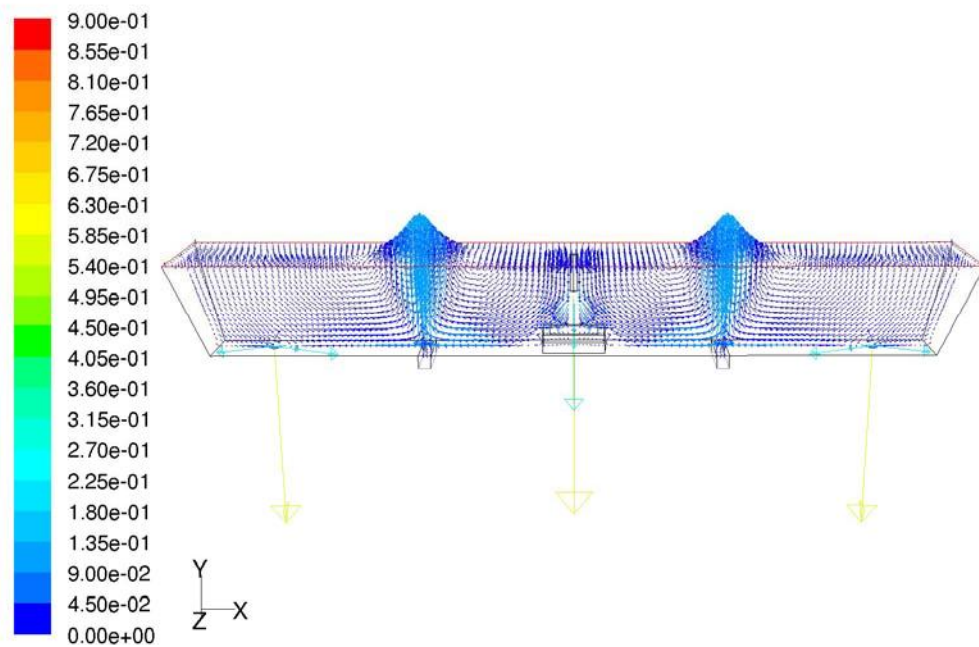
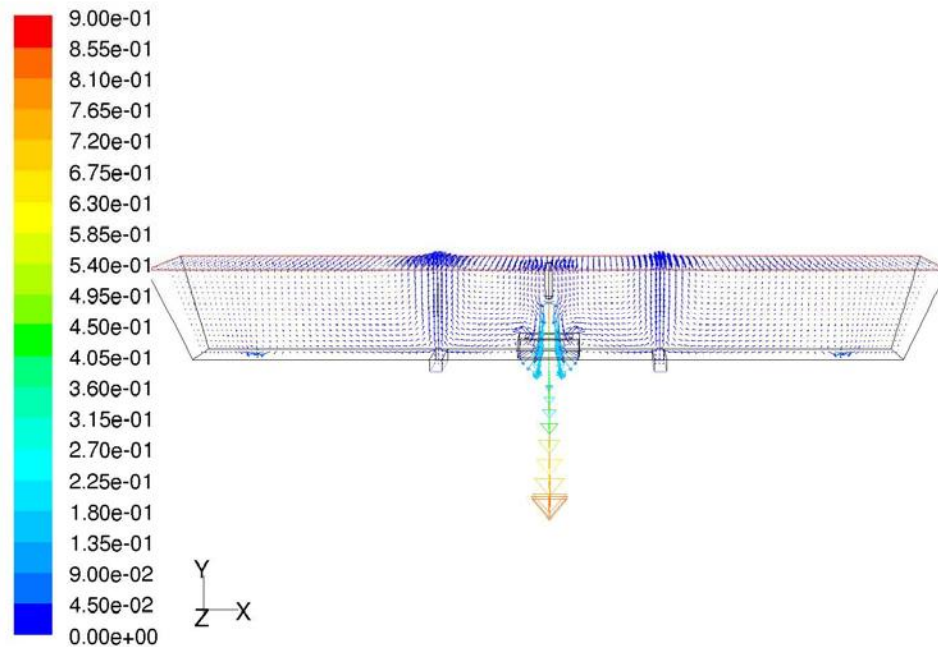
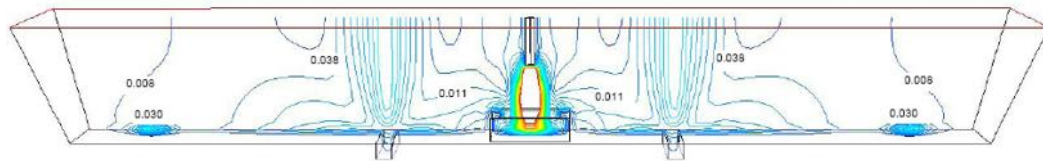


Figura 4.23, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor

4.5.5.- Posición 5.

*Figura 4.24, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor**Figura 4.25, Isolineas de velocidad (m/s) del distribuidor*

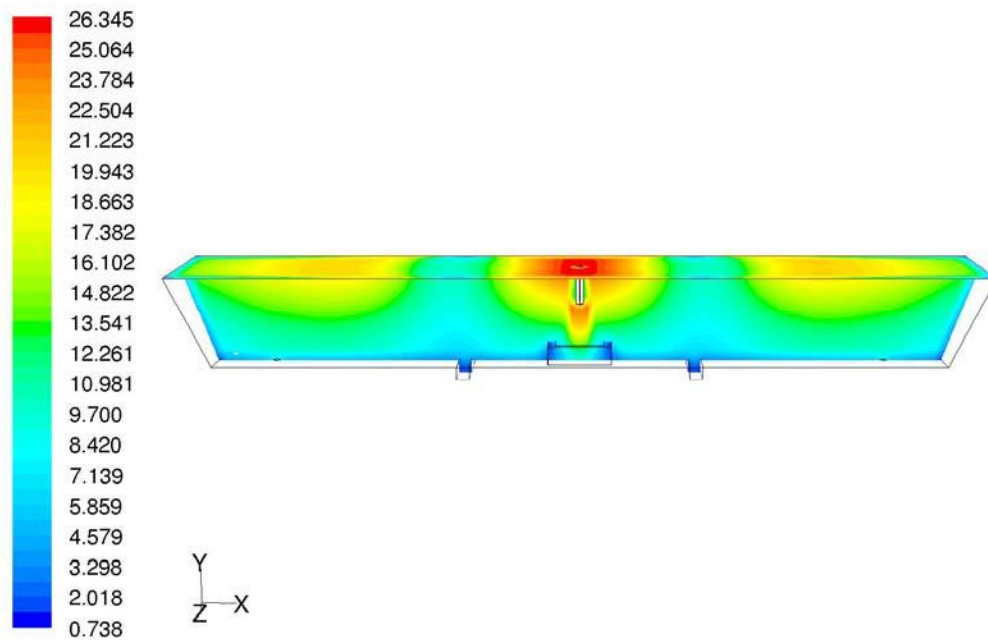


Figura 4.26, Porcentaje de los contornos de turbulencia del distribuidor

4.5.6.- Posición 6.

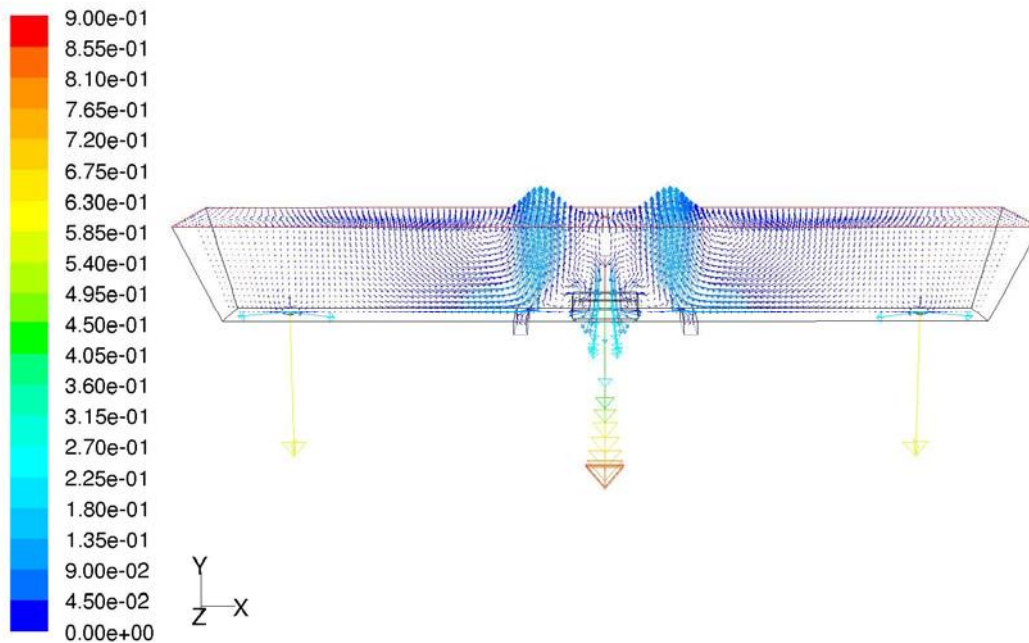


Figura 4.27, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor

En las figuras 4.28 y 4.29, se puede observar la importancia del inhibidor de turbulencia ya que las cortinas de burbujas están inactivas y el efecto que el inhibidor tiene para

con el mezclado del acero. Además de mencionar que las pérdidas por erosión del refractario del fondo serian muy serias.

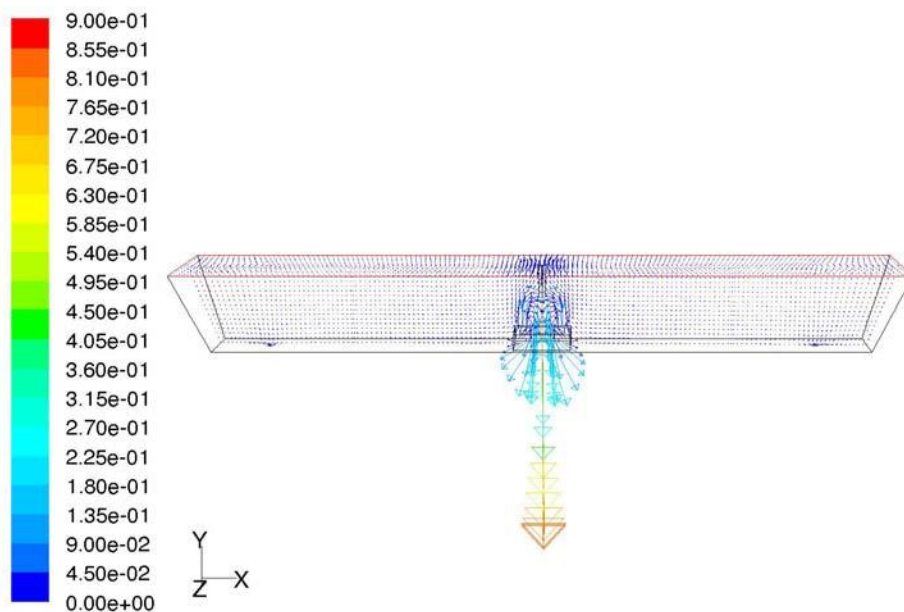


Figura 4.28, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor

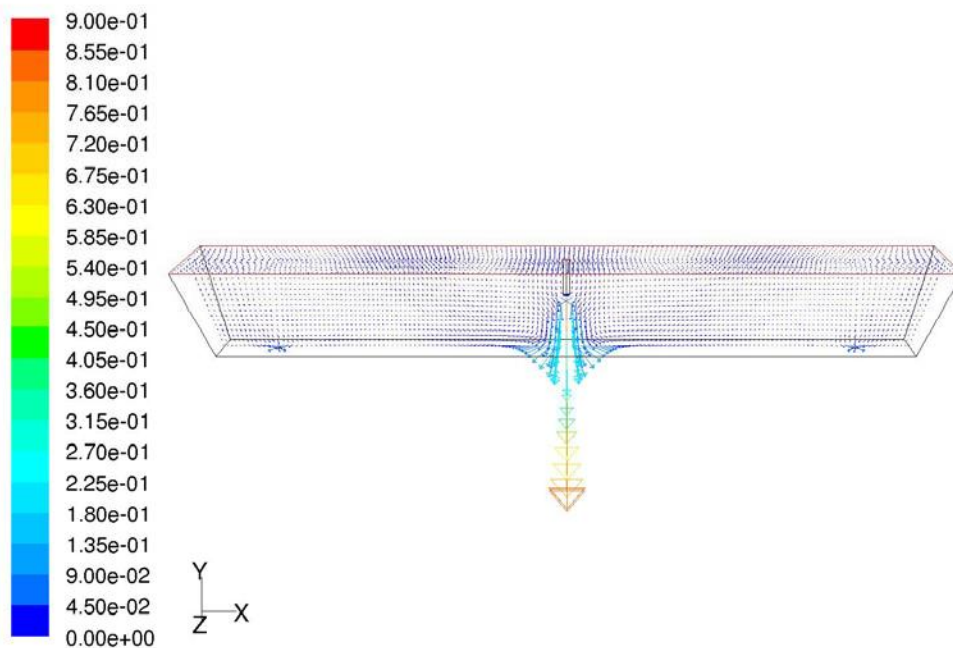


Figura 4.29, Vectores de velocidad (m/s) del distribuidor sin inhibidor de turbulencia

4.6.- Curvas F.

En este tipo de curvas se presenta la magnitud de temperatura con que cada sensor varió en función del tiempo. Se observa en las figuras 4.30 – 4.32 y 4.39 – 4.44 pérdidas de calor que sin duda alguna se dan por las paredes y superficie del distribuidor, ya que las cortinas están inactivas es decir, no hay inyección de aire para considerar el efecto solo del cambio de olla; se debe mencionar que el sistema no fue aislado en su periferia.

En cuanto a los sensores del interior se puede observar que están en la misma posición. Los detalles del cálculo del tiempo adimensional y la temperatura adimensional se muestra en el apéndice uno. También se muestra en las figuras 4.33 – 4.38 y 4.45 – 4.47 la magnitud de las lecturas de temperatura de los sensores del baño y las descargas para valorar la pérdida de temperatura que presenta el fluido en un recorrido tan corto como lo es de las cortinas a las salidas del modelo.

En la tabla 4.I siguiente, se indican las variantes que presentó cada experimento en relación al cambio de olla, uso de cortinas de aire (burbujas) y uso de la capa de escoria (parafina líquida), y en la tabla 4.II se muestra el equivalente de las abreviaciones empleadas en las figuras de las curvas F que van de la 4.30 – 4.47 y las curvas C que comprenden las figuras de la 4.48 – 4.61.

Tabla 4.I. Detalles de los experimentos

Literales	Nombre	Equivalente
(a)	C.O.	Cambio de Olla
(b)	C.O.B.	Cambio de Olla – Burbujas
(c)	C.O.B.E.	Cambio de Olla – Burbujas – Escoria
(d)	C.O.E.	Cambio de Olla – Escoria
(e)	V.C.O.	Vacío – Cambio de Olla
(f)	V.C.O.B.	Vacío – Cambio de Olla – Burbujas

*Vacío se refiere a sin inhibidor de turbulencia

Tabla 4.II. Detalles de los gráficos (ubicación de sensores)

Nombre	Equivalente
Alimentación	Alimentación
S. Izq	Salida izquierda
S. Der	Salida derecha
Der. c	Derecha – centro
Der. f	Derecha – frente
Izq. c	Izquierda – centro
Izq. a	Izquierda – atrás

* Ver figura 3.54, 3.55 y la tabla 3.VII

Para el experimento que corresponde únicamente al cambio de olla se observa en las figuras 4.30 – 4.32 que las pérdidas de temperatura antes y después de la cortina son despreciables pero las pérdidas que registran las salidas con respecto a la alimentación son del orden de las 4.7 °C.

Para el inciso (b) de la tabla 4.I que corresponde al experimento dos en donde se utilizó el cambio de olla y las cortinas de aire (burbujas) se observa que hay pérdidas de temperatura de 4.2 °C.

En las tablas 4.III y 4.IV se resumen las lecturas así como las pérdidas de temperatura que presentó cada experimento respectivamente y que relaciona a las figuras 4.30 – 4.47.

Tabla 4.III. Temperatura registrada por los sensores

Experimento	°C						
	alimentación	S. izq	S. der	Der. c	Der. c	Izq. c	Izq. a
(a)	39.9	35.3	35.1	37.3	37.4	37.9	37.8
(b)	40.4	36.1	36.2	39.0	38.0	39.0	38.0
(c)	41.5	37.5	37.7	40.5	39.8	40.6	39.9
(d)	40.1	36.7	36.3	38.8	38.7	39.1	39.3
(e)	41.2	36.3	36.1	38.7	38.2	38.8	38.4
(f)	41.0	36.4	36.4	38.7	38.3	38.9	38.7

Tabla 4.IV. Pérdidas de temperatura

Experimento	°C				ΔT
	alimentación	S. izq	S. der	Promedio salidas	
(a)	39.9	35.3	35.1	35.2	4.7
(b)	40.4	36.1	36.2	36.2	4.2
(c)	41.5	37.5	37.7	37.6	3.9
(d)	40.1	36.7	36.3	36.5	3.6
(e)	41.2	36.3	36.1	36.2	5.0
(f)	41.0	36.4	36.4	36.4	4.6

Si comparamos los resultados de los experimentos de literal (b), (c) y (f), que corresponden a los experimentos cuya configuración fue cambio de olla – burbujas, cambio de olla – burbujas – escoria y vacío (sin inhibidor de turbulencia) – cambio de olla – burbujas respectivamente, podemos obtener que el experimento tres cuya literal es (c) presenta una menor pérdida de temperatura debido a que la capa de escoria (parafina líquida) sirve como agente aislante. Lo anterior se puede corroborar en los experimentos (c) y (d) en donde se utilizó capa de escoria. El experimento (d) presenta menores pérdidas de temperatura, pero no se debe olvidar que no se activaron para su configuración las cortinas de burbujas.

El experimento que presentó mayores pérdidas de temperatura fue el número cinco cuya literal es (e) y que su configuración no presentó el efecto del inhibidor de turbulencia.

(a)

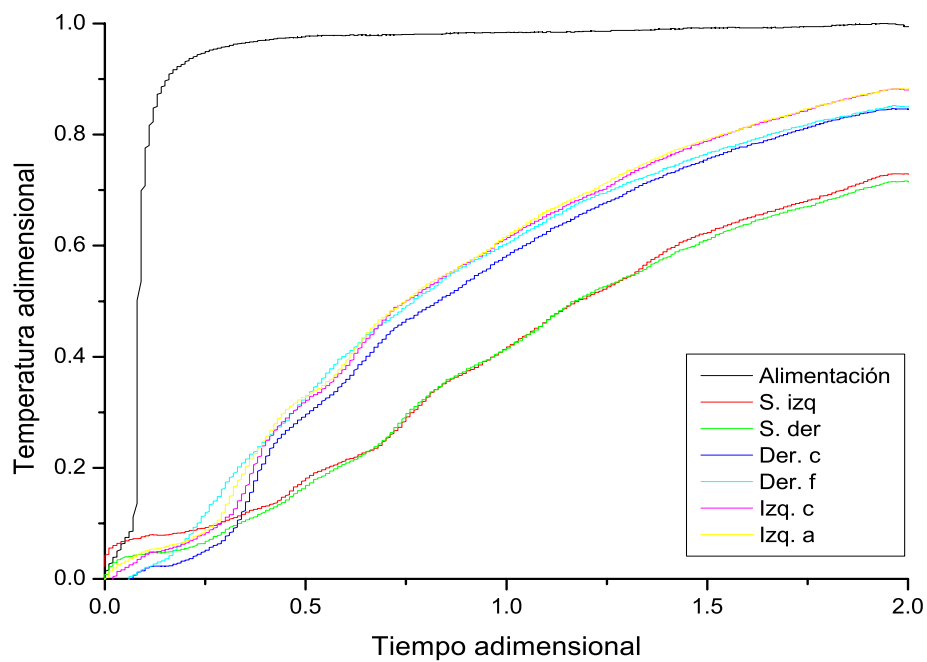


Figura 4.30, Comparativo de todos los sensores de temperatura

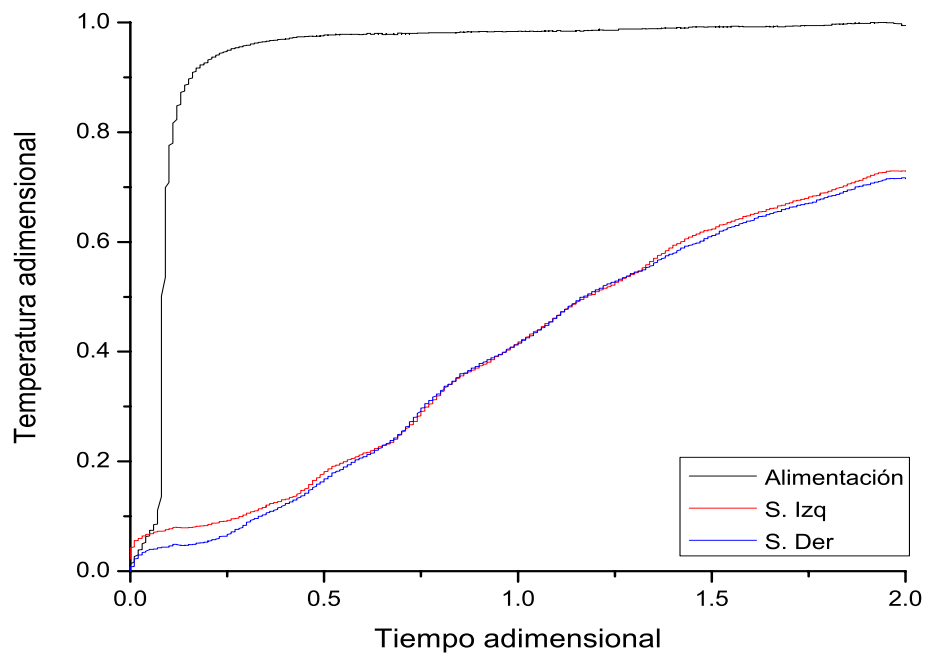


Figura 4.31, Comparativo de la entrada y salidas

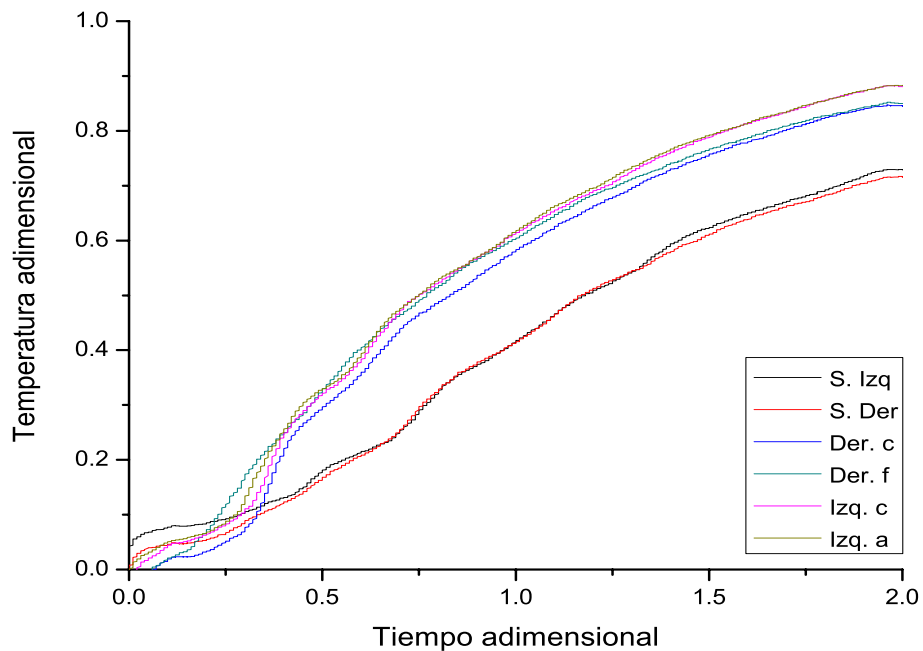


Figura 4.32, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas

(b)

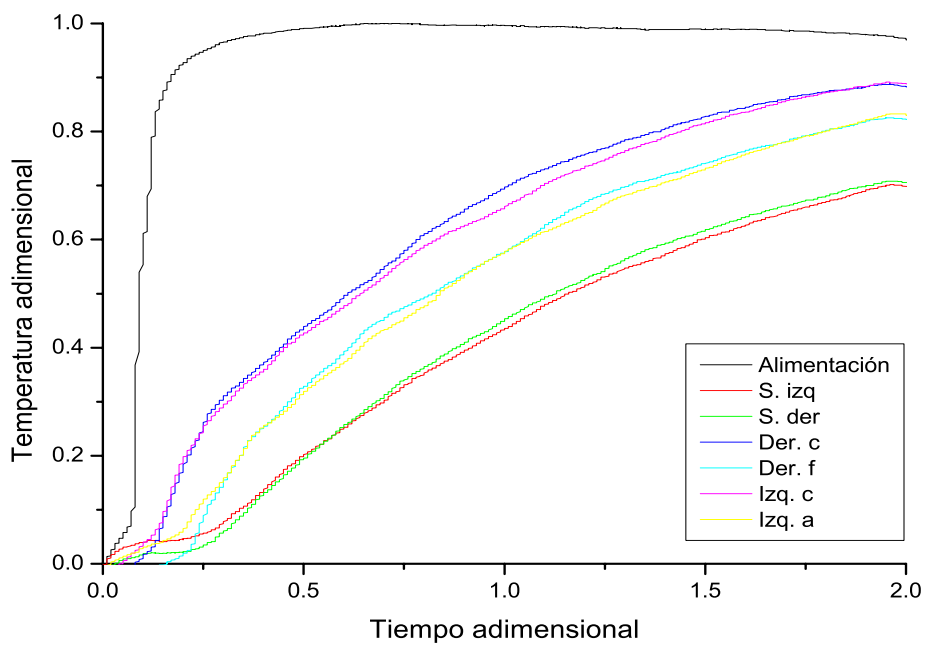


Figura 4.33, Comparativo de todos los sensores de temperatura

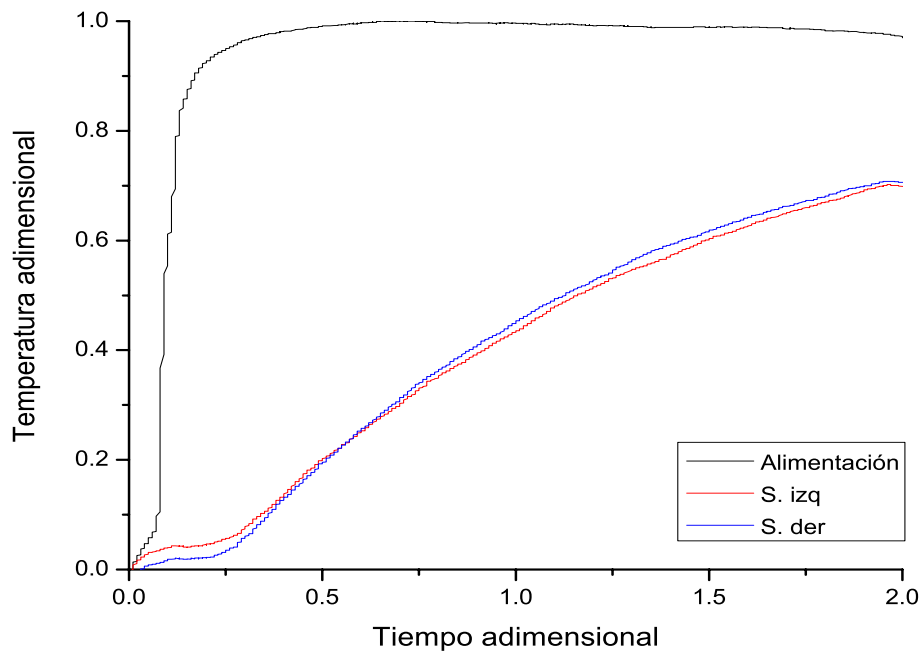


Figura 4.34, Comparativo de la entrada y salidas

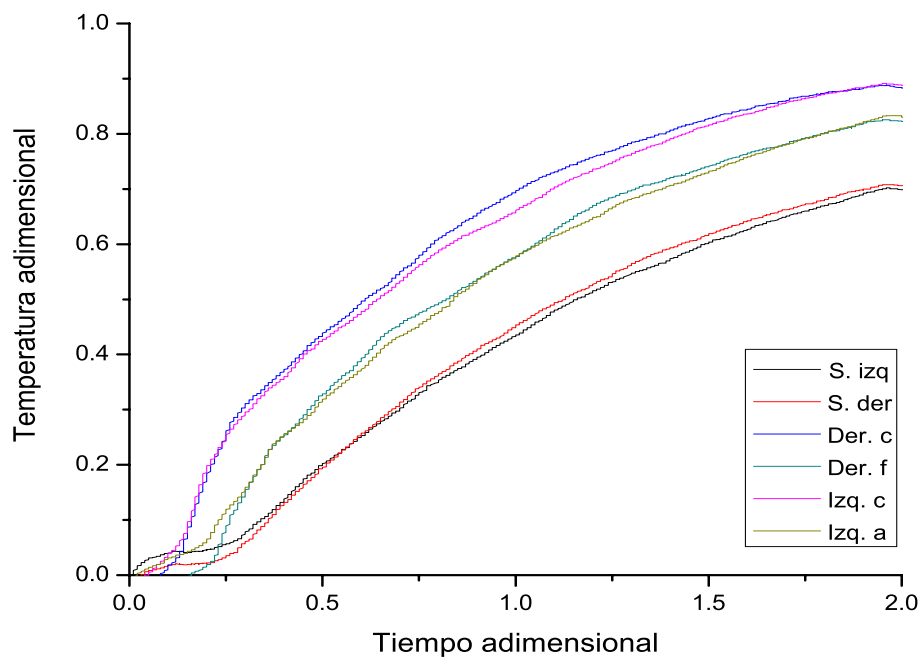


Figura 4.35, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas

(c)

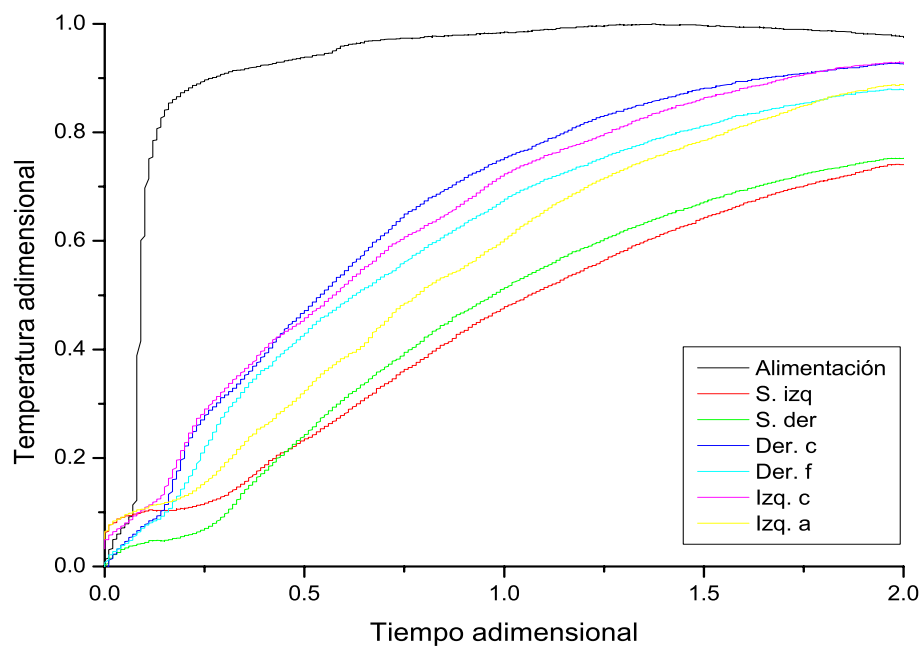


Figura 4.36, Comparativo de todos los sensores de temperatura

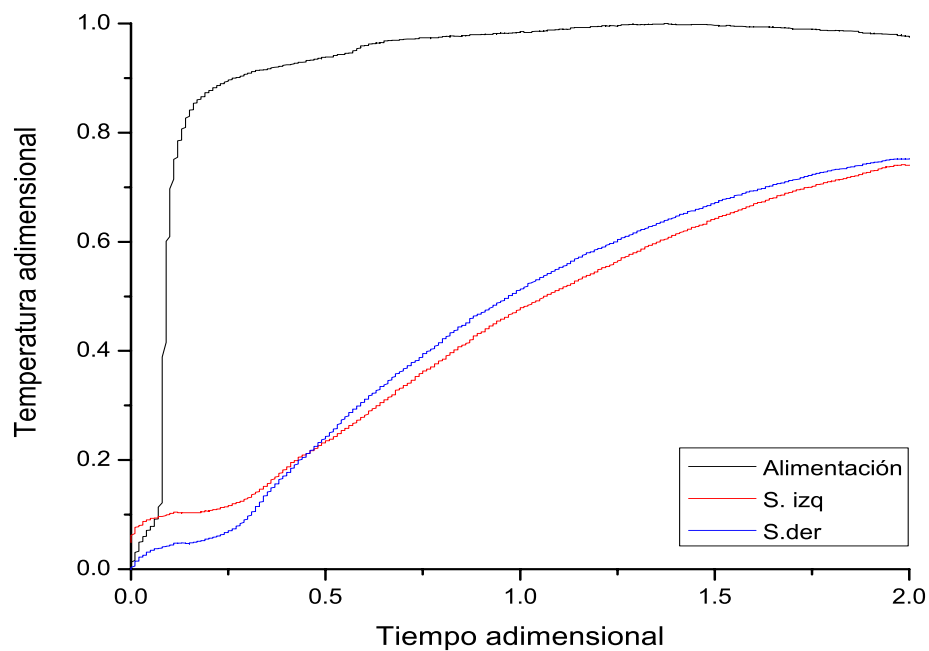


Figura 4.37, Comparativo de la entrada y salidas

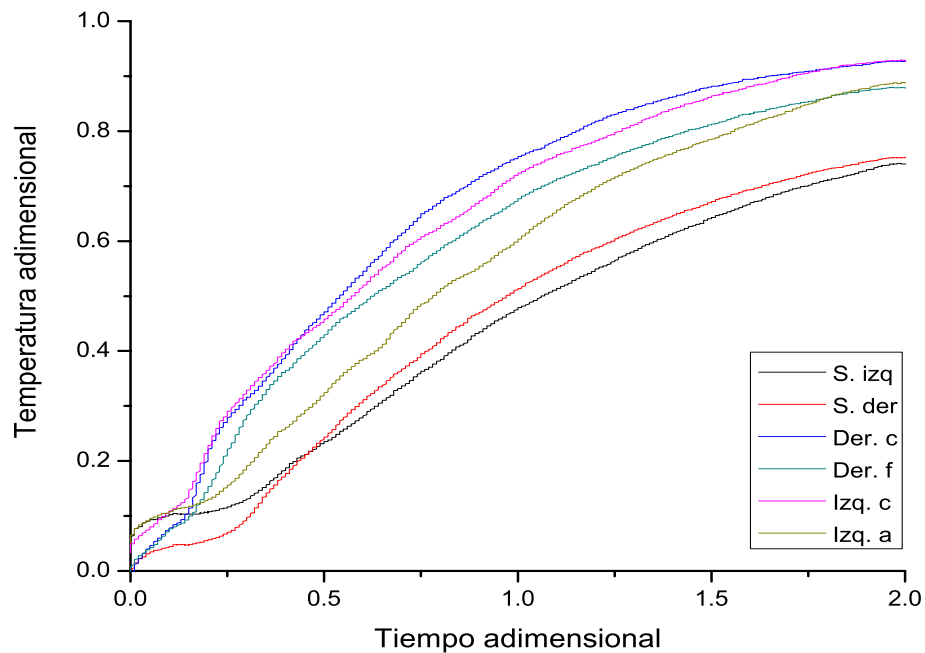


Figura 4.38, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas

(d)

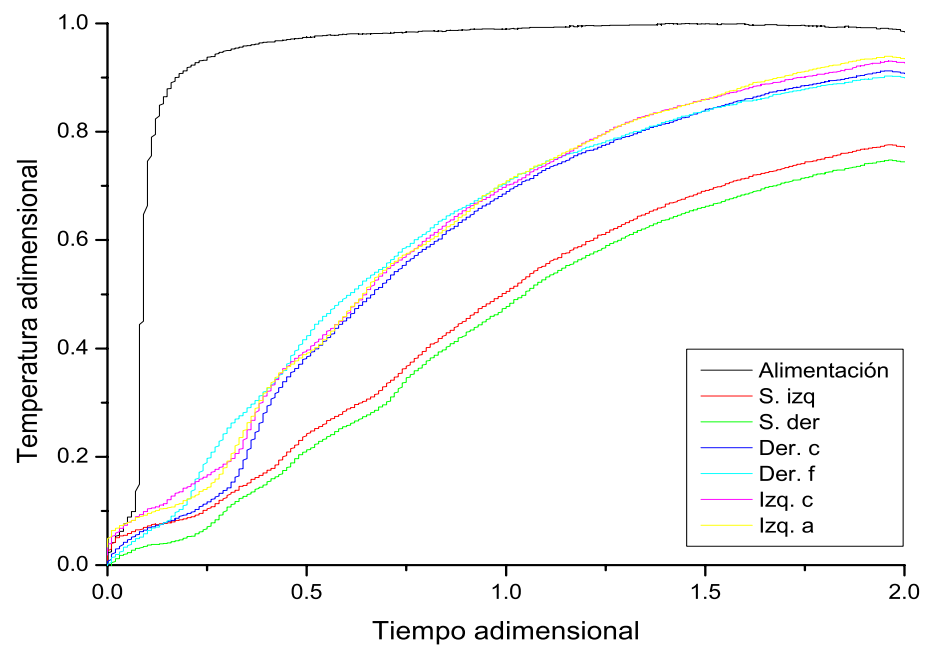


Figura 4.39, Comparativo de todos los sensores de temperatura

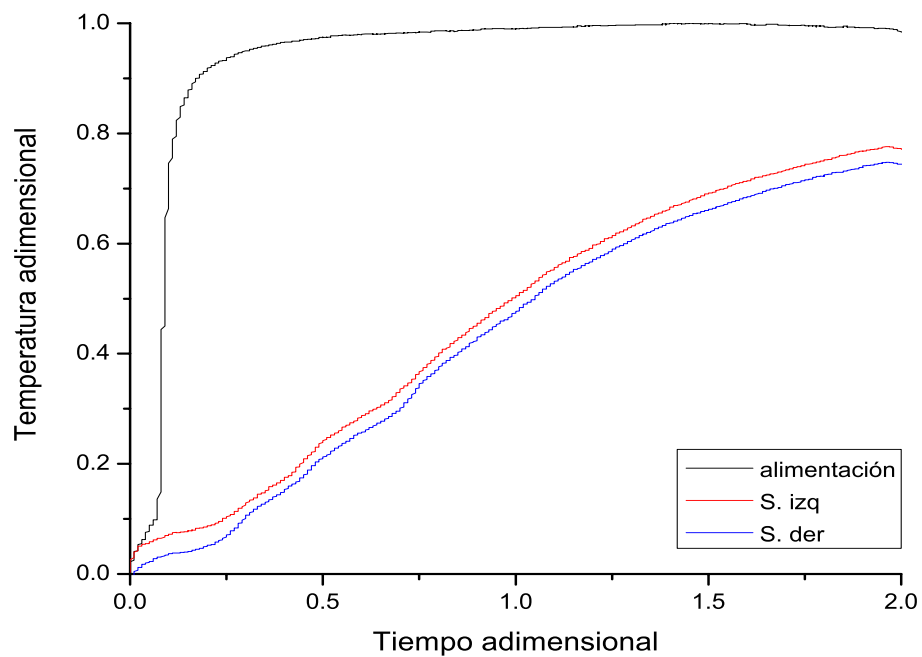


Figura 4.40, Comparativo de la entrada y salidas

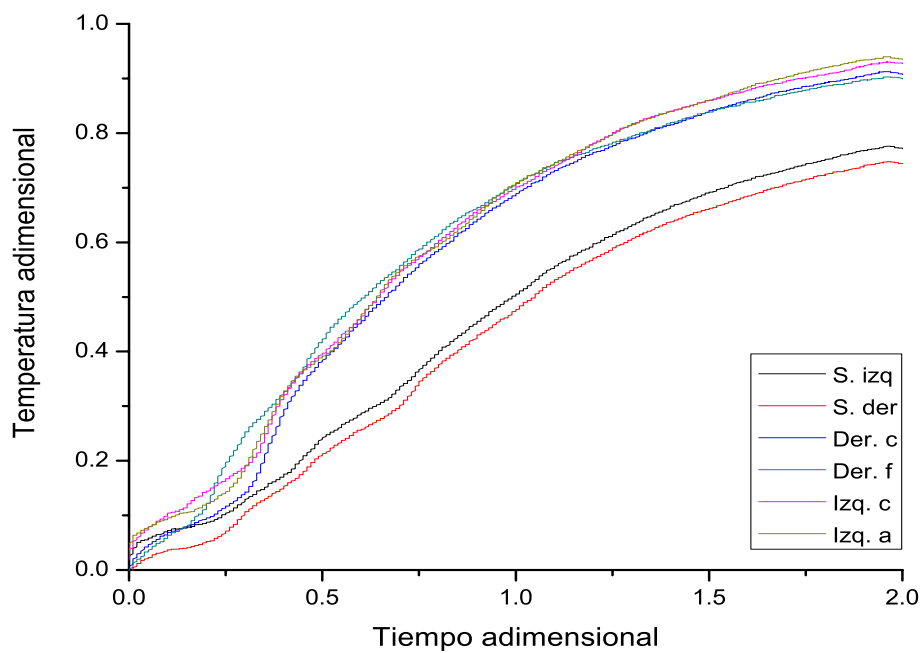
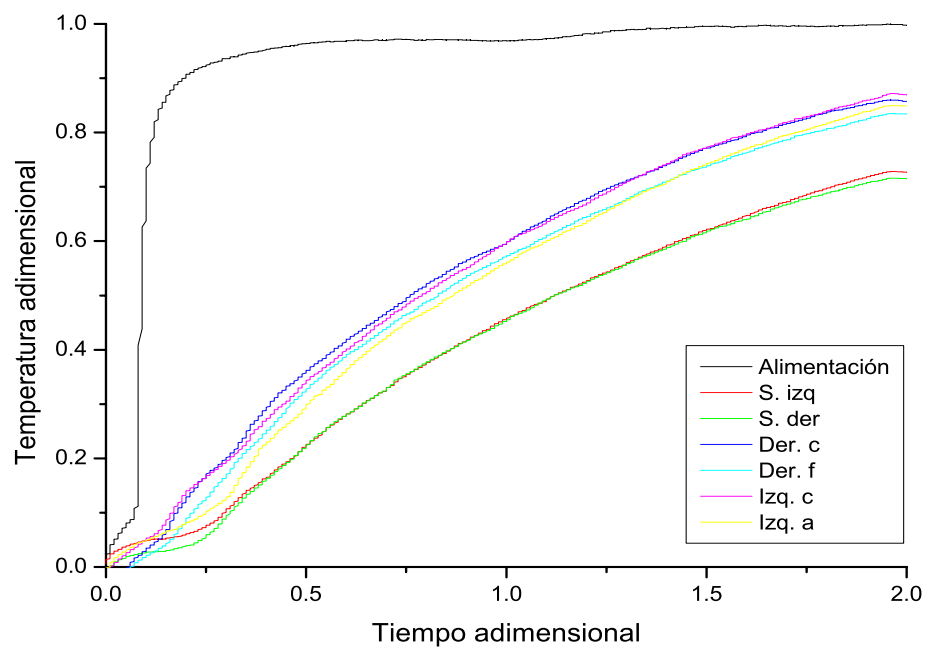
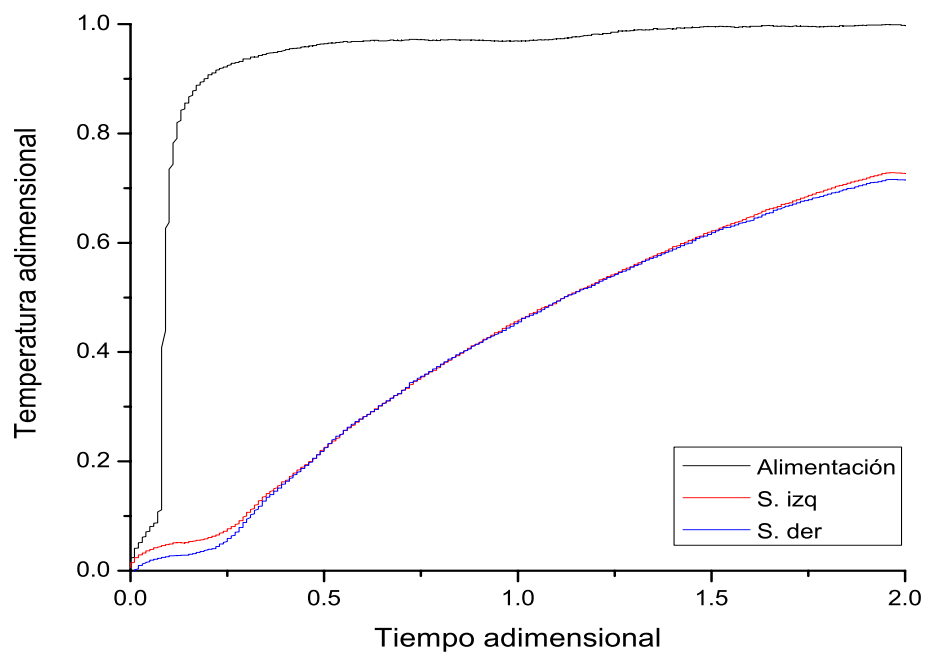


Figura 4.41, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas

(e)

*Figura 4.42, Comparativo de todos los sensores de temperatura**Figura 4.43, Comparativo de la entrada y salidas*

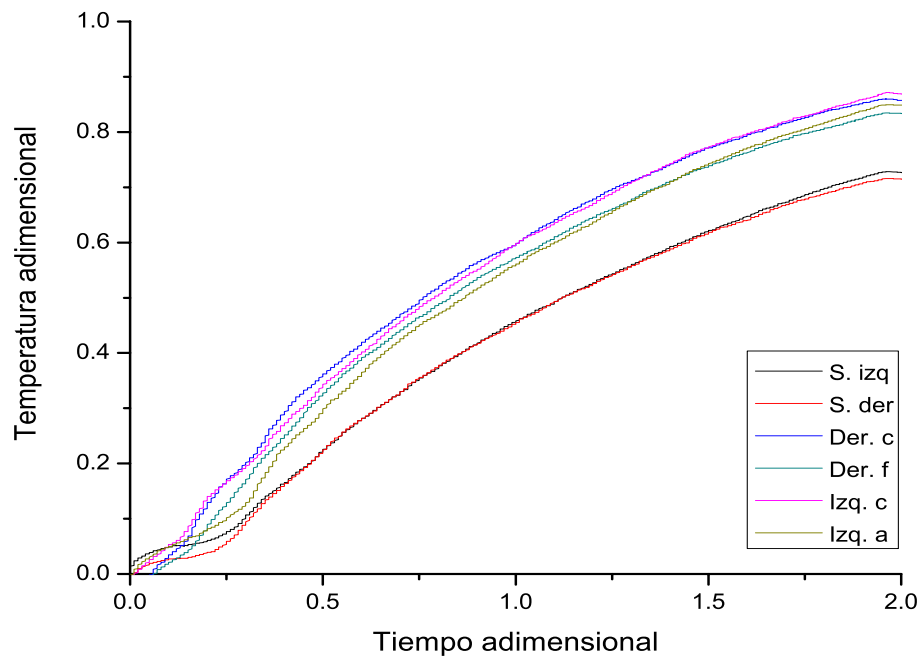


Figura 4.44, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas

(f)

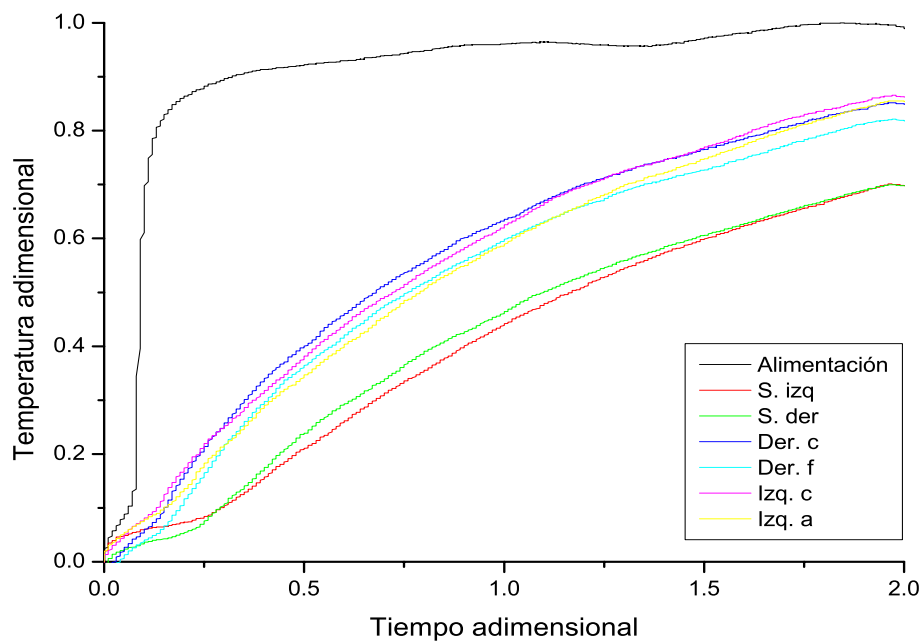


Figura 4.45, Comparativo de todos los sensores de temperatura

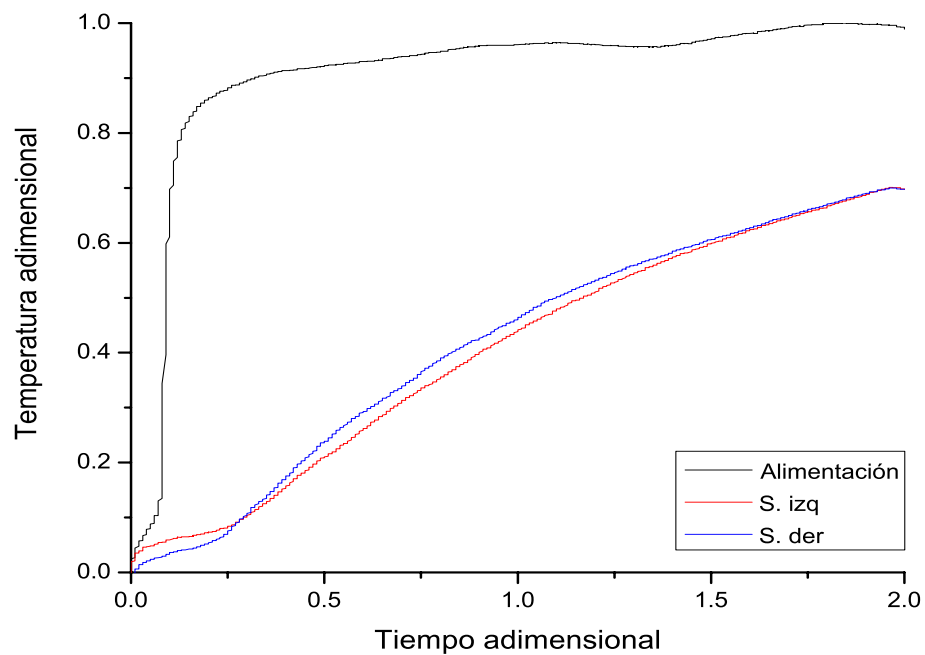


Figura 4.46, Comparativo de la entrada y salidas

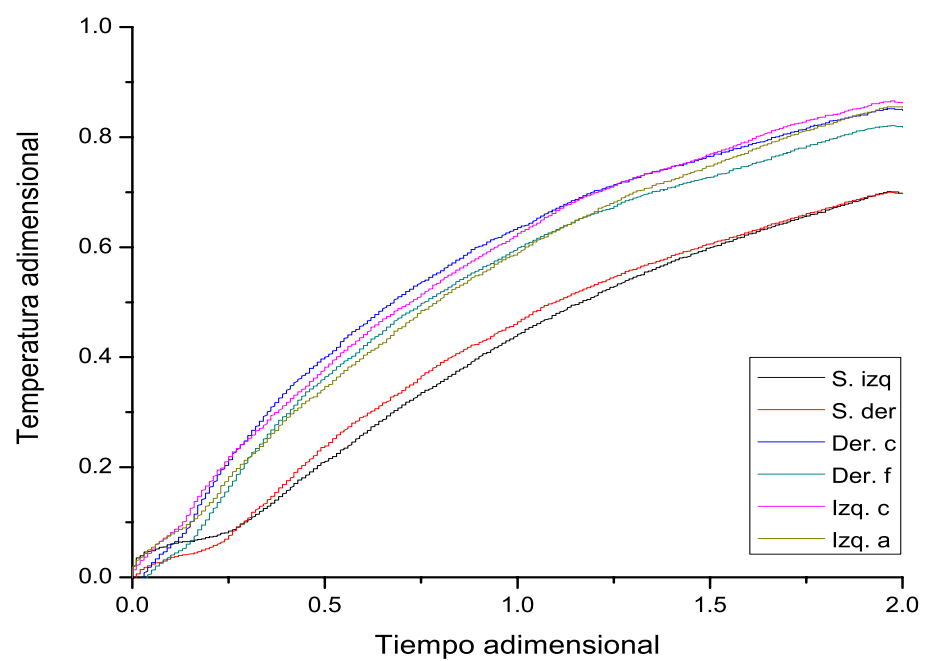


Figura 4.47, Comparativo de los sensores del baño de agua y las salidas

4.7.- Curvas C y caracterización del flujo.

Se realizaron seis experimentos con tres réplicas cada uno las cuales se promediaron para cada práctica dando lugar a un conjunto de datos de los cuales se determinó el tipo de flujo para cada promedio.

En el apéndice I, se marca el procedimiento a seguir para normalizar la temperatura, es decir, para convertir las curvas F a curvas C. las curvas ya normalizadas y para cada experimento se muestran en las figuras 4.48 – 4.61.

En la tabla 4.V, se puede observar que donde se obtuvo el mayor volumen muerto corresponde al experimento con cambio de olla y cortinas de aire. El mayor volumen pistón corresponde al experimento con cambio de olla, corinas de aire y escoria, el mayor volumen de mezclado fue para el experimento que involucró cambio de olla, cortinas de aire y escoria.

Tabla 4.V. Resumen de las proporciones de los diferentes tipos de flujo

	Arreglo	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
$\frac{V_{DE}}{V}$	S. izq	0.192	0.219	0.188	0.201	0.206	0.204
	S. der	0.231	0.226	0.201	0.219	0.212	0.199
$\frac{V_{Pi}}{V}$	S. izq	0.515	0.515	0.525	0.515	0.515	0.515
	S. der	0.505	0.510	0.515	0.510	0.510	0.515
$\frac{V_M}{V}$	S. izq	0.293	0.266	0.287	0.284	0.279	0.281
	S. der	0.264	0.264	0.284	0.271	0.278	0.286

En general el experimento (c), con el arreglo de inhibidor de turbulencia, cambio de olla, cortinas de aire, capa de escoria; presenta el volumen muerto más bajo y el más alto volumen pistón, y de mezclado, además de ser el que presenta menos pérdidas de temperatura.

a)

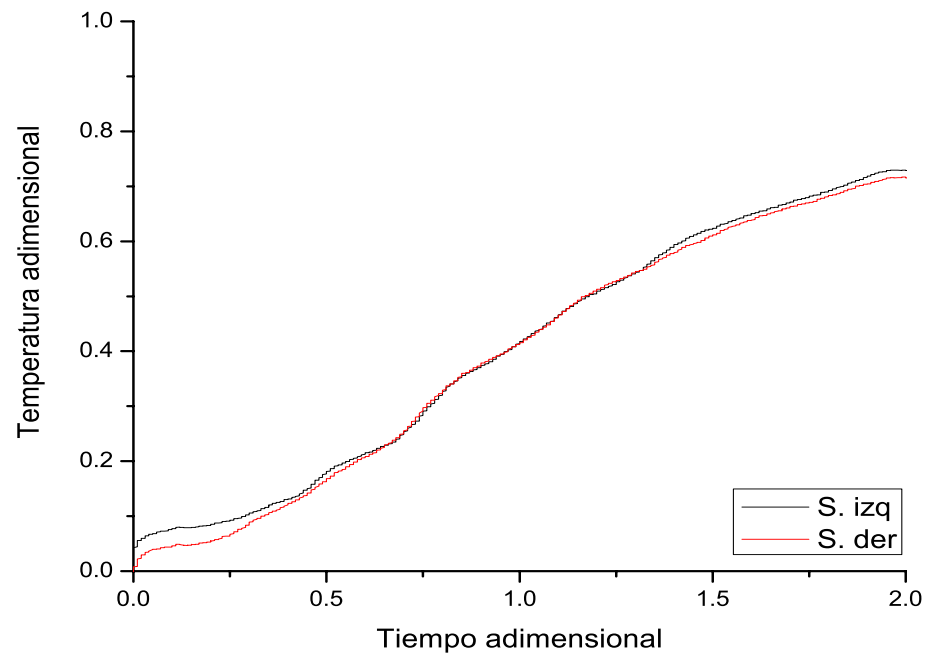


Figura 4.48, Comparativo de las salidas

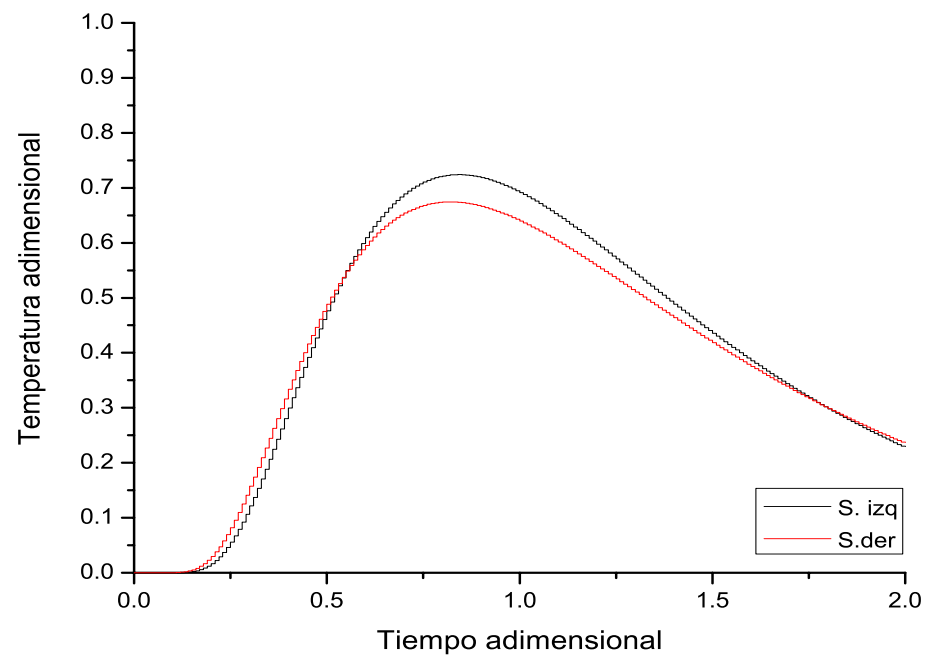
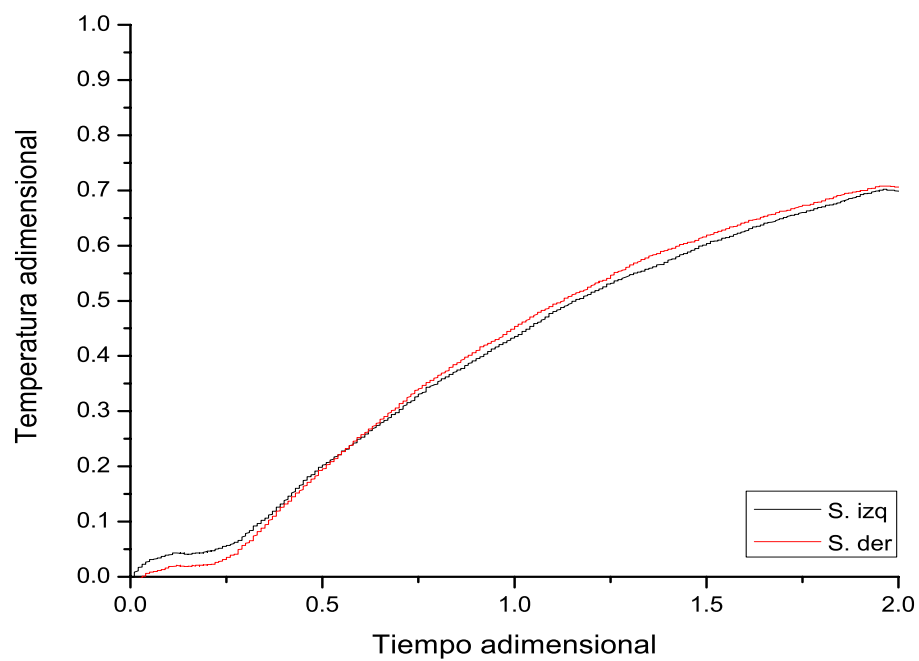
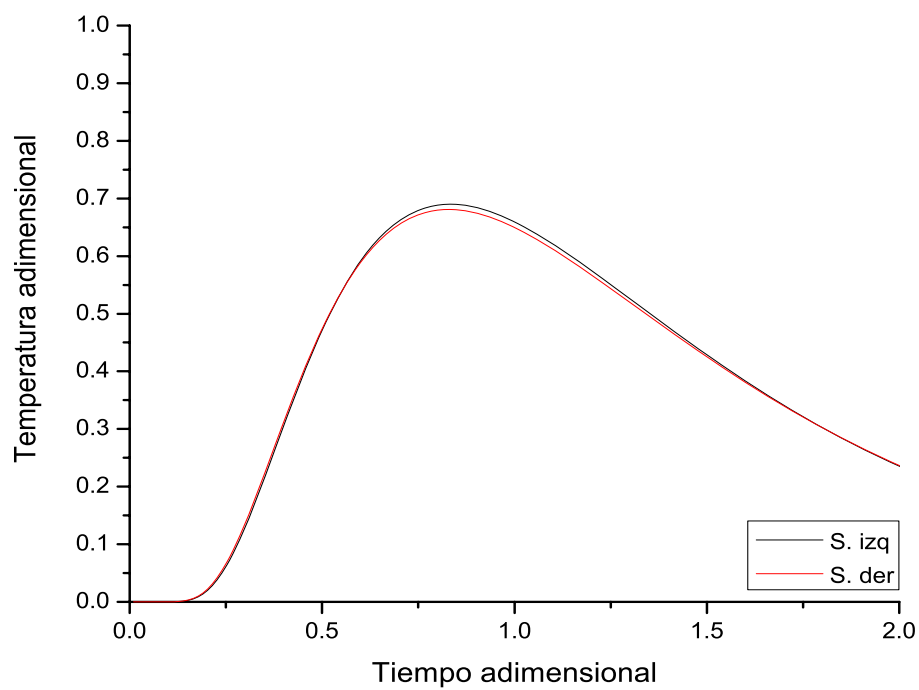
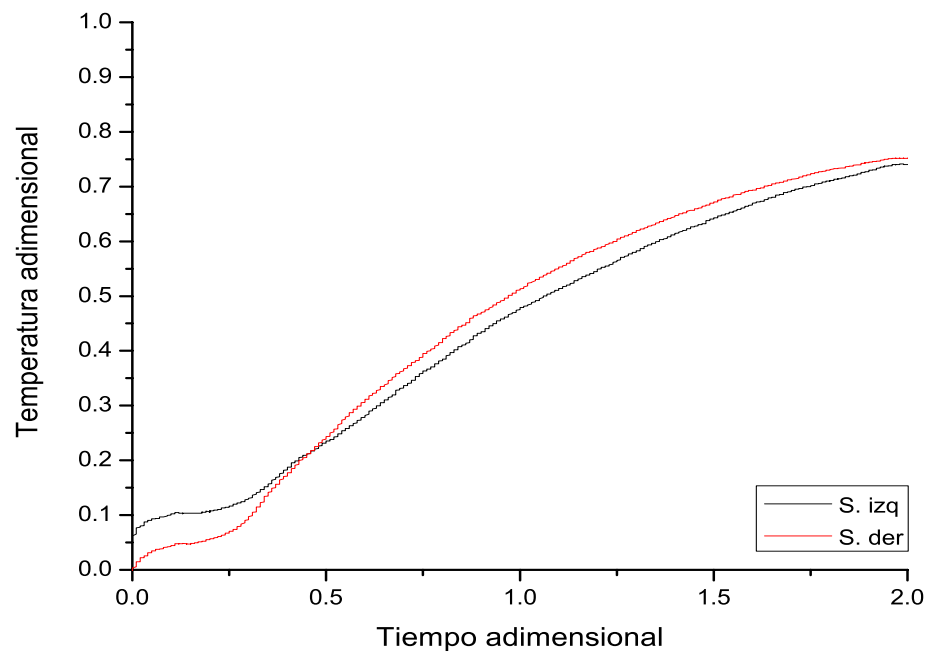
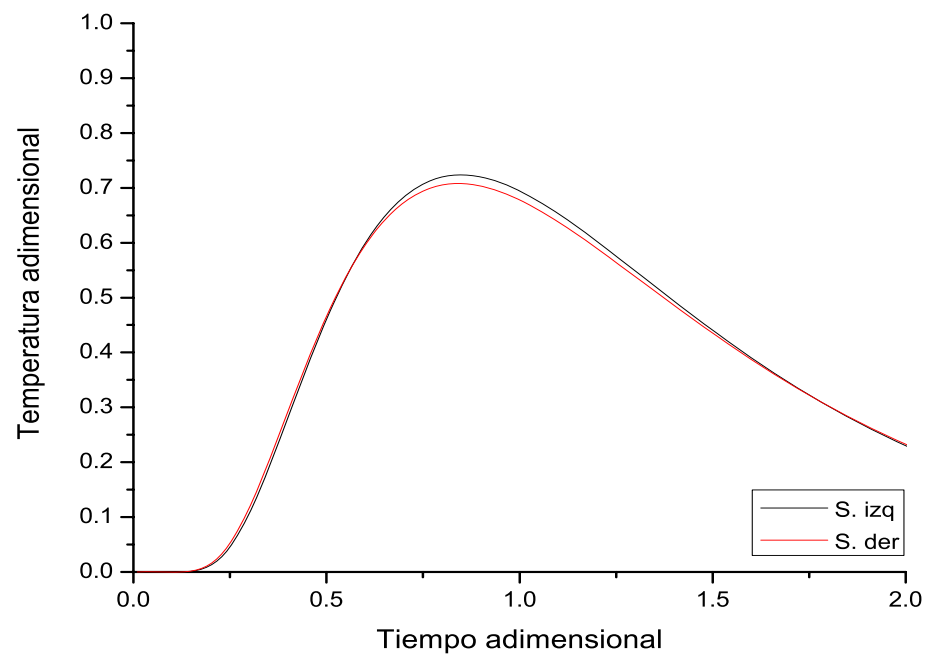


Figura 4.49, Comparativo de las salidas normalizadas

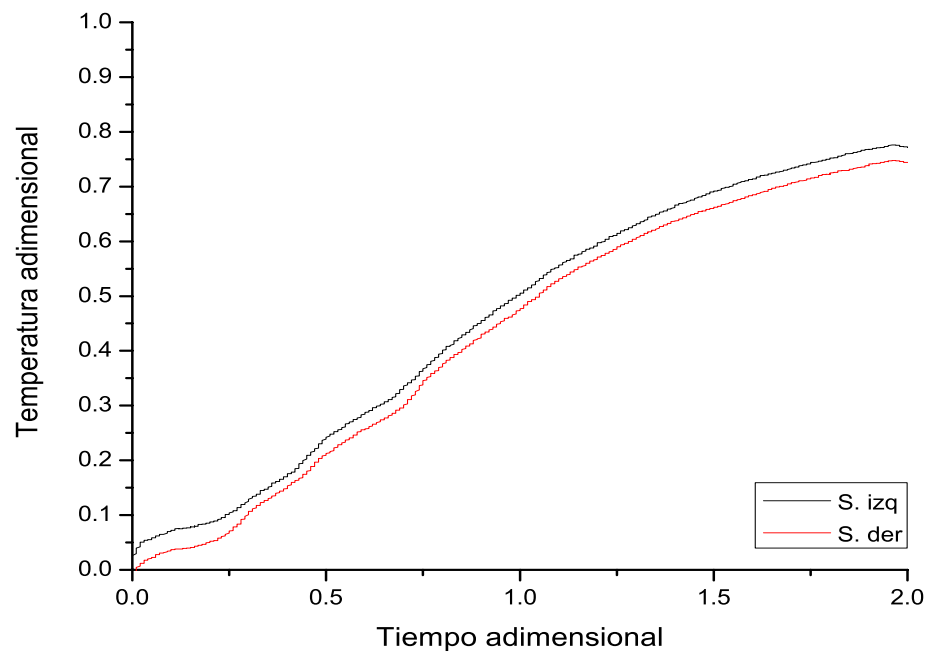
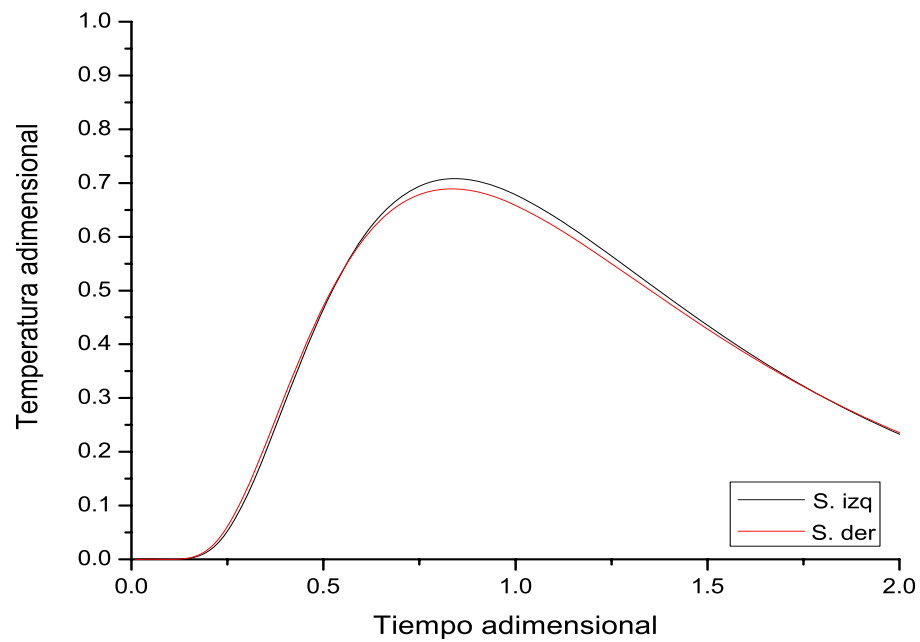
b)

*Figura 4.50, Comparativo de las salidas**Figura 4.51, Comparativo de las salidas normalizadas*

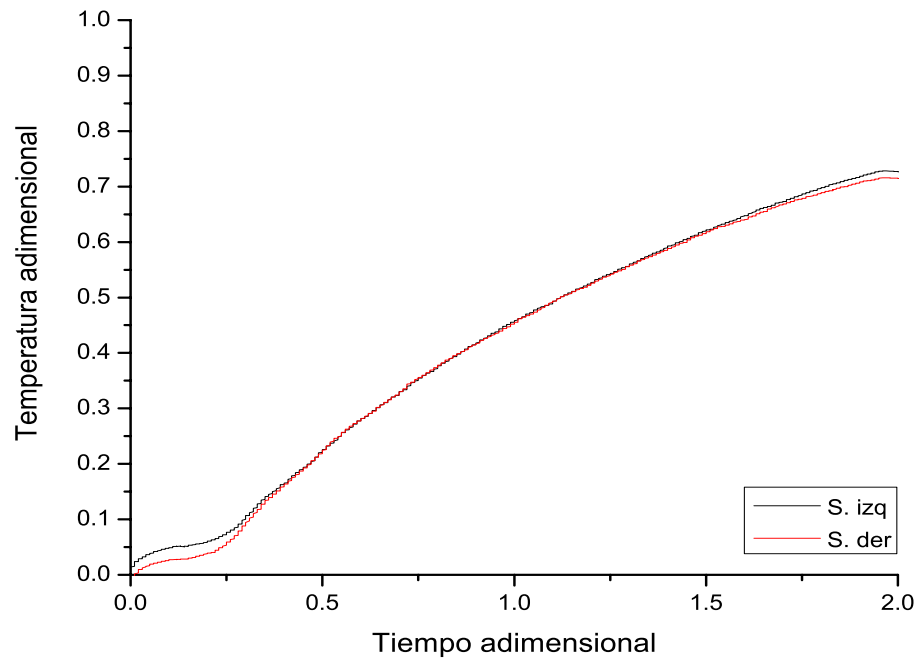
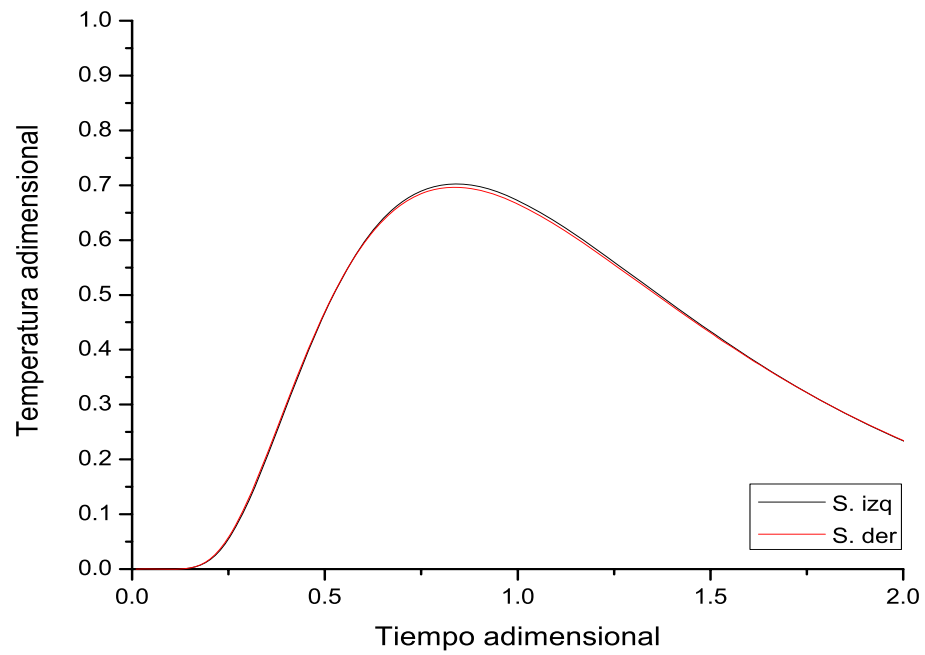
c)

*Figura 4.52, Comparativo de las salidas**Figura 4.53, Comparativo de las salidas normalizadas*

d)

*Figura 4.54, Comparativo de las salidas**Figura 4.55, Comparativo de las salidas normalizadas*

e)

*Figura 4.56, Comparativo de las salidas**Figura 4.57, Comparativo de las salidas normalizadas*

f)

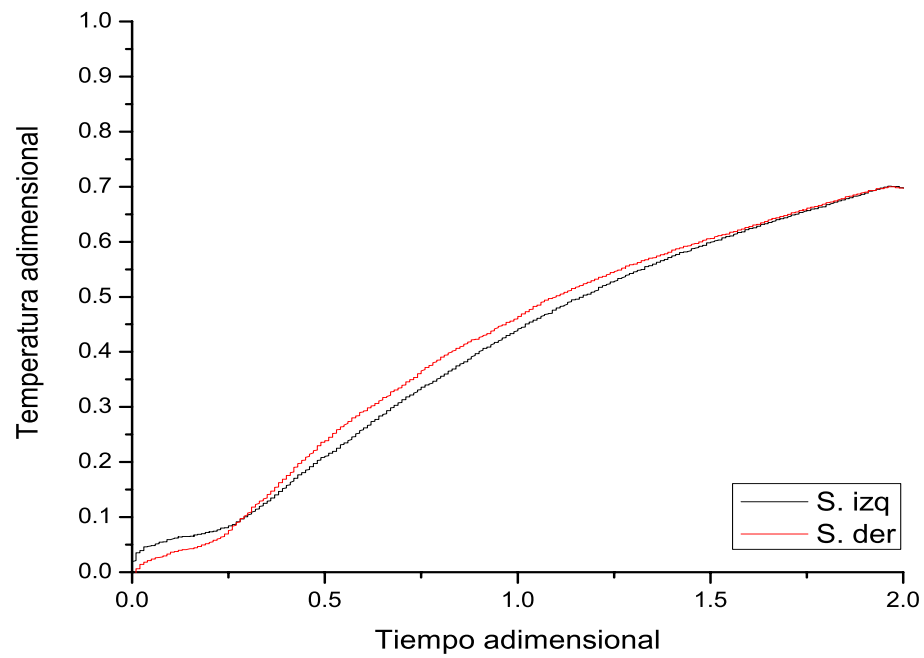


Figura 4.58, Comparativo de las salidas

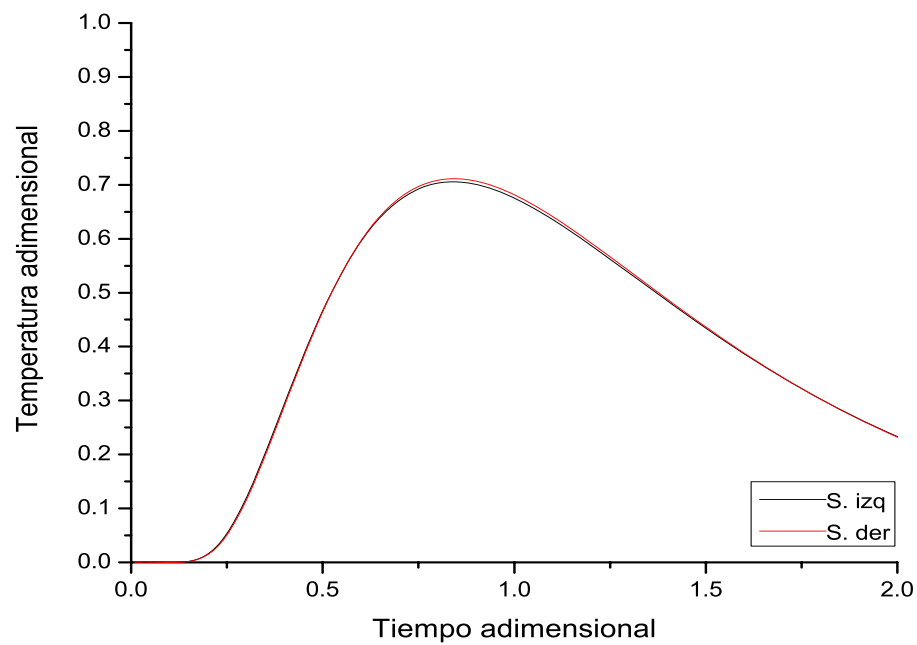


Figura 4.59, Comparativo de las salidas normalizadas

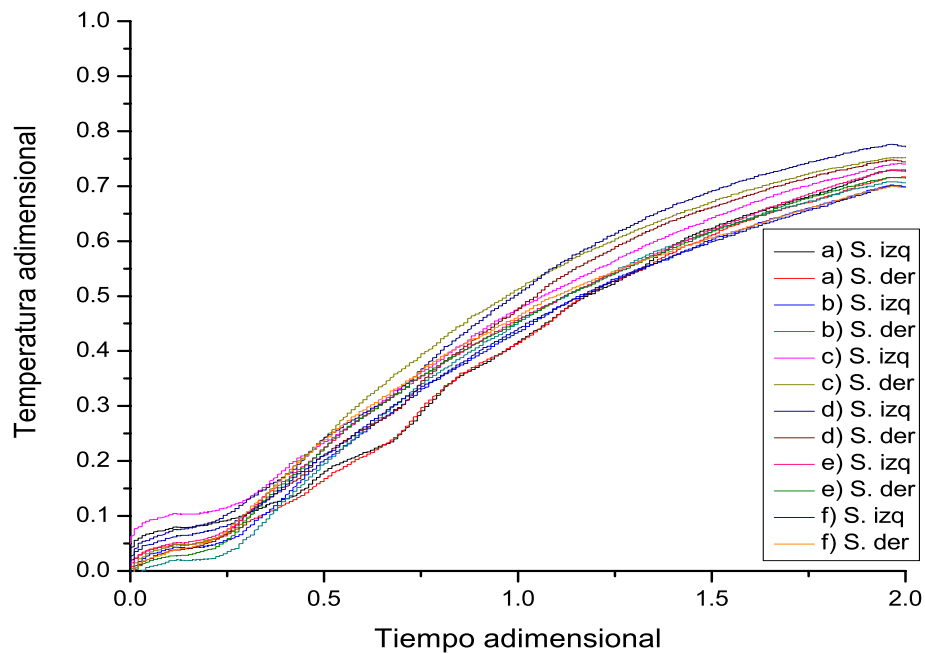


Figura 4.60, Comparativo de las descargas para todos los experimentos

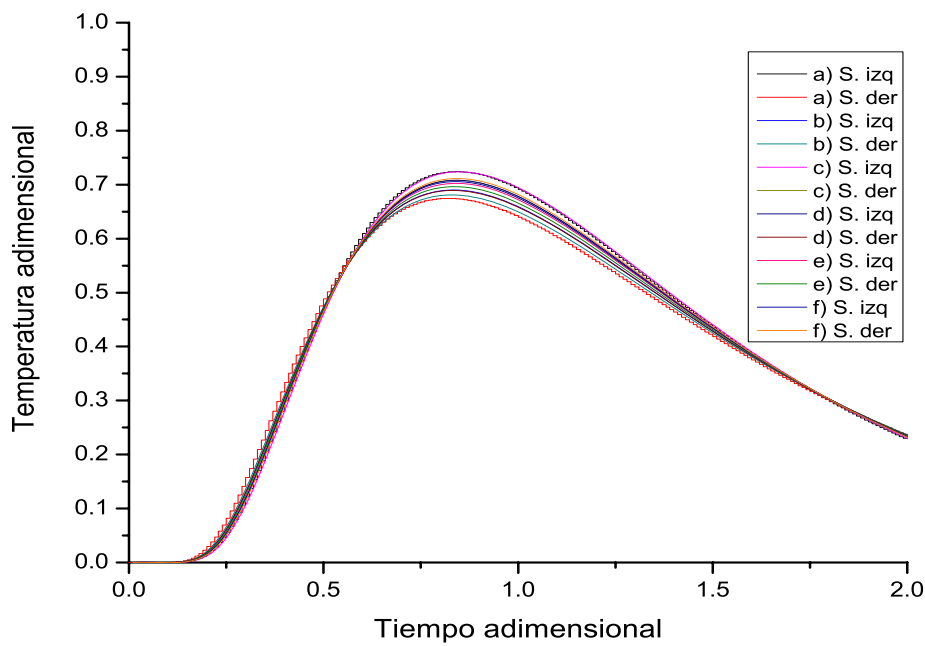
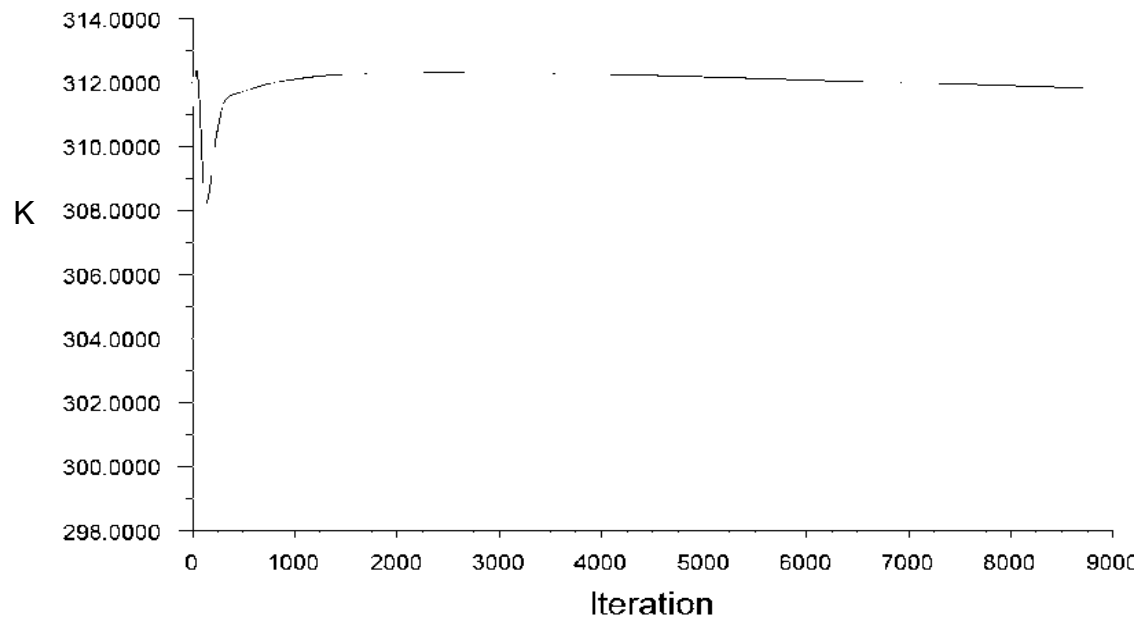


Figura 4.61, Comparativo de las descargas normalizadas para todos los experimentos

4.8.- Simulación física contra simulación matemática.

En la figura 4.62 se realiza el comparativo de las lecturas tomadas por el sensor de temperatura en la alimentación involucrado en el modelo físico, con el monitoreo de la temperatura obtenido en el modelo matemático en la alimentación; dando como resultado una relación de temperatura en la alimentación de 313 K y 312 K respectivamente. Hasta el momento lo que resulta ser muy interesante ya que con estas similitudes podemos validar el modelo físico.

En las figuras 4.63 y 4.64 se observa además que la temperatura del modelo matemático no alcanza la temperatura máxima captada por los sensores del baño de agua en el modelo físico, esto se debe a que simplemente hay que llevar a cabo unos cientos más de iteraciones en el programa, también la tendencia de la curva denota incremento en función del número de iteraciones adicionales.



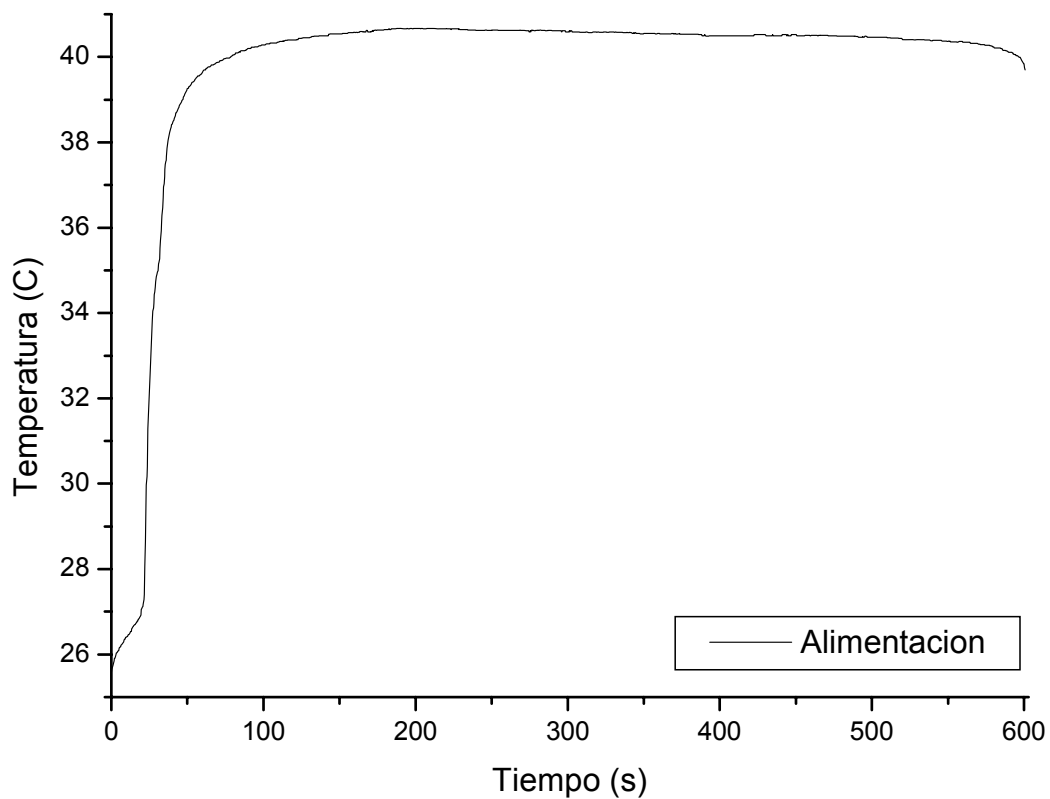
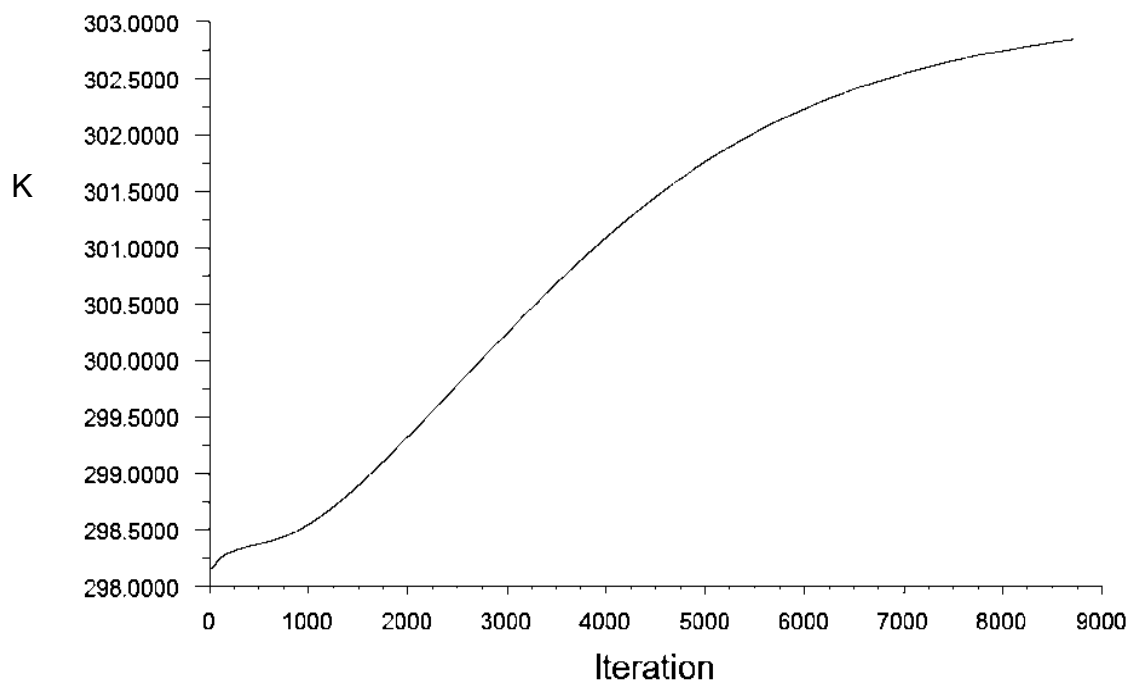


Figura 4.62, Alimentación (Alimentación)



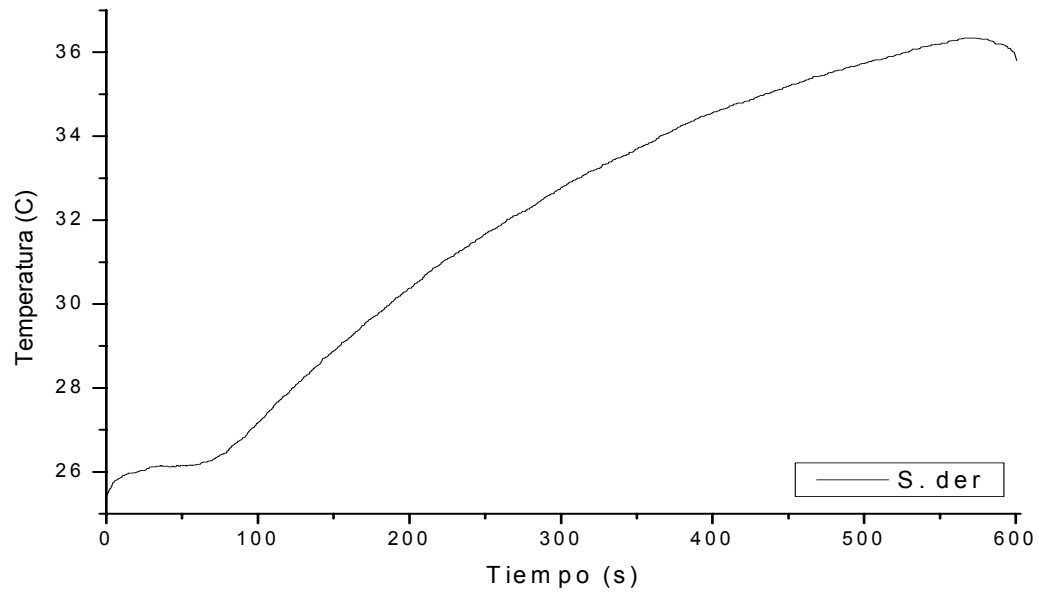
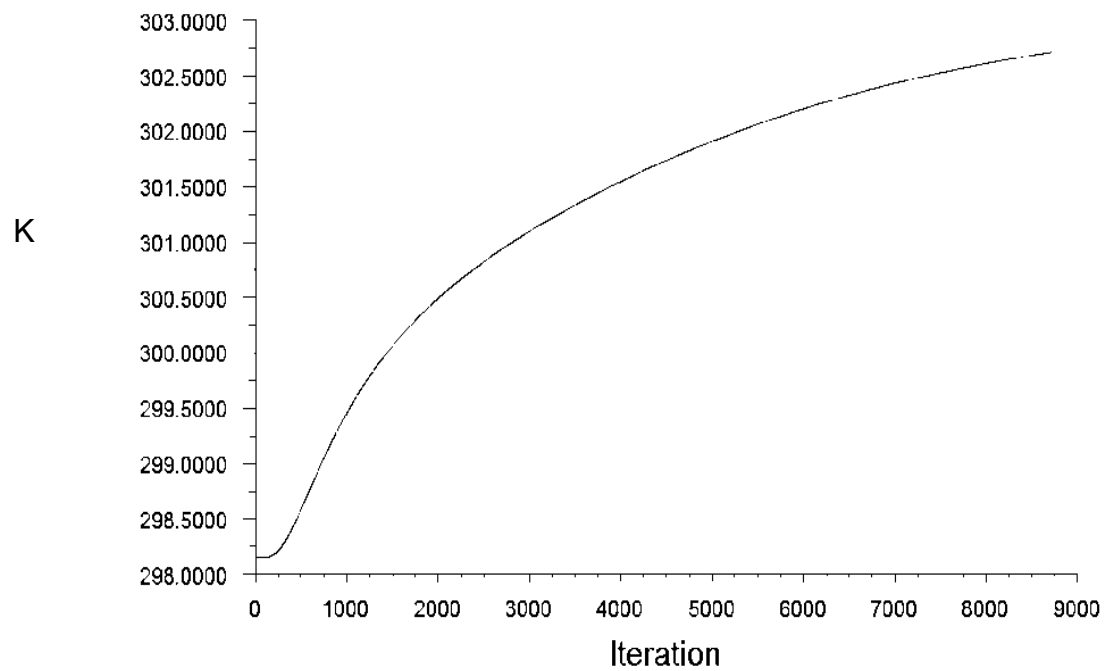


Figura 4.63, Descarga derecha (S. der)



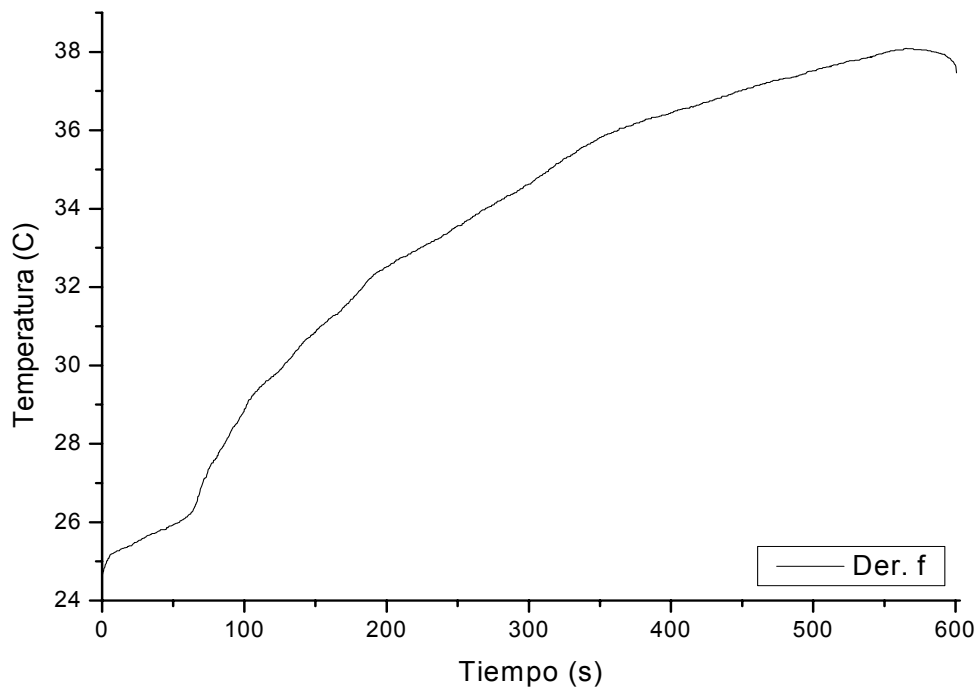


Figura 4.64, Sensor derecho antes de la cortina (Der. f)

Se puede constatar que el mejor arreglo para trabajar es el correspondiente al uso de cambio de olla, cortinas activas de burbujas y capa de escoria, señalado con el experimento tres cuya literal es (c). Por otro lado la semejanza en las curvas obtenidas tanto de la simulación matemática como de los cálculos de la simulación física es muy similar, por tal razón el modelado matemático se aproxima al fenómeno físico.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.- Conclusiones.

- 1.- El uso de cortinas de burbujas en el distribuidor de colada de acero presentó pérdidas de temperatura considerables (la mayor fue de 4.7 °C en agua equivalentes a 15.7 °C en acero). El experimento que presentó menor pérdida de temperatura fue el correspondiente al inciso (c) de los tres que utilizaron cortinas de burbujas.
- 2.- La capa de parafina líquida (escoria) sirve como agente aislante ya que al utilizarla sirvió como agente aislante según los resultados.
- 3.- El arreglo que presentó mayor flujo pistón, mayor flujo de mezclado y menor flujo muerto fue el correspondiente al cambio de olla, uso de cortinas de burbujas y capa de escoria (inciso c).
- 4.- El comportamiento de los burbujeadores modelados matemáticamente fue muy similar al comportamiento de los construidos en acrílico.
- 5.- Las lecturas de temperatura simuladas matemáticamente se comportan de manera muy similar a los datos obtenidos por los sensores de temperatura en el modelo físico.

5.2.- Recomendaciones.

- 1.- Simular física y matemáticamente el uso de diferentes fluidos que representen a la capa de escoria en el distribuidor.
- 2.- Simular física y matemáticamente el uso de diferentes medios porosos.
- 3.- Modelar físicamente la posición cuatro de las cortinas de burbujas de aire.
- 4.- Aislar el modelo térmicamente para cuantificar con más exactitud la cantidad de temperatura que se pierde por el efecto de los dispositivos modificadores de flujo y la periferia.
- 5.- Utilizar agua destilada para evitar el problema de formación de acreciones en la superficie del aereador.
- 6.- Se recomienda el uso de un sistema de calentamiento externo (uso de plasma por ejemplo) para evitar posibles taponamientos o aceros con baja calidad microestructural.

REFERENCIAS

- [1] American Institute of Mining and Metallurgical Engineers (AIME), Continuous Casting, New York, 1973, p.p. 679 – 695.
- [2] Warner, J. C. y Brandt, D. A., Metallurgy Fundamentals, The Goodheart – Willcox, United States of America, 2005, p.p. 301.
- [3] Sheng, D. – Yuang, y Kim, C. – Soo., “Water Model Study on Convection Pattern of Molten Steel Flow in Continuous Casting Tundish”, ISIJ International, Vol 38, N° 8, 1998, p.p. 843 – 851.
- [4] McLean, A., “The Turbulent Tundish – Contaminator or Refiner?”, Proc. Steelmaking Conf., Iron and Steel Society, 71. 1998. p.p. 3 – 23.
- [5] Schade, J. y Zacharias, J. D., “Tundish Operations, Continuous Casting”, Chapter 13, The AISE Steel Foundation, 2003, Pittsburgh, p.p. 1 – 76.
- [6] Magdaleno J., Modelación Física del Comportamiento de Inclusiones no Metálicas en el Distribuidor de Colada Continua, Tesis de maestría en ciencias en metalurgia, I.T.M., 2004, p.p. 112.
- [7] Wolf, M. M., “Slab Caster, Tundish Configurations and Operations – a Review”, Proc. Steelmaking Conf., 79, 1996, p.p. 367 – 381.
- [8] Barrera, G. y Barreto, J. de J., “Análisis del Desempeño Hidrodinámico Anisotérmico del Distribuidor de la Máquina de Colada Continua de Acero, IDEAS, UAEM, 1997.
- [9] Yamamura, H. y Ueshima, Y., “Development of Technology for Blowing Fine Bubbles into Tundish Through Porous Plug Using Molten Steel Flow”, Conference Proceedings, ISSTECH, 2003, p.p. 19 – 30.

- [10] Dauby, P. H., "A Steel Quality Leapfrog: Detection and Elimination of Ladle – to – Tundish Slag Carryover", Proc. Process Technology Division Conf. Iron and Steel Society, 9, 1990, p.p. 33 – 39.
- [11] Guthrie, I. L. R., "Fluid Flow in Metallurgy – Friend of Foe?", Howe Memorial Lecture, Volume 35B, Metallurgy and Materials Transactions B, June 2004, p.p. 417 – 437.
- [12] Sahai, Y. y Damle, C., "A Criterion for Water Modeling of Non – Isothermal Melt flows in Continuous Casting Tundishes", ISIJ International, Vol. 36, N° 6, 1996, p.p. 681 – 689.
- [13] McLean, A. Heaslip, L. J. y Sommerville, I. D., "Chemical and Physical Interactions During Transfer Operations", Continuous Casting. Fluid Flow, Vol. 1, Chapter 2, Warrendale, Pa: Iron and Steel Society Inc., 1983, p.p. 67 – 84.
- [14] Bird, R. B. Stewart, W. E. y Lightfoot, E. N., Fenómenos de Transporte, Ed. Reverte, Primera edición, Quinta reimpresión, 1998.
- [15] Szekely, J., Fluid Flow Phenomena in Metals Processing, Academic Press, New York, 1979, p.p. 235.
- [16] Barreto, J. de J., y Barron M. M. A., "Physical and Mathematical Modeling of Steel Flow and Heat Transfer in Tundishes Under Non – Isothermal and Non – Adiabatic Conditions, ISIJ International, Vol. 36, N° 5, 1996, p.p. 543 - 552.
- [17] Sahai, Y. y Lowry, M. L., "Thermal Effects on the Flow of Liquid Steel in Continuous Casting Tundishes", Iron and Steelmaking, Vol. 19, N° 3, 1992, p.p. 81 – 86.
- [18] Sahai, Y. y Chakraborty, S., "Effect of Varying Ladle Stream Temperature on the Melt Flow and Heat Transfer in Continuous Casting Tundishes", ISIJ International, Vol. 35, N° 2, 1995, p.p. 163 – 169.

- [19] Streeter, L. V. y Wyle, E. B., *Mecánica de los Fluidos*, Octava edición, McGraw – Hill, Mexico, 1988, p.p. 594.
- [20] Heslip, L. J. y McLean, M., “Tundish Metallurgy, Considerations Portainig to Tundish Performance and Metallurgy Treatment During Continuous Casting”, University of Toronto.
- [21] Sahai, J. y Damle, C. S., “The Effect of Tracer Density on Melt Flow Caracterization in Continuous Casting Tundishes – A Modeling Study”, *ISIJ International*, Vol. 35, N° 2, 1995, p.p. 193 – 169.
- [22] Orozco G. C., *Simulación Física anisotérmica de un Reactor de Flujo Continuo de Colada de Acero*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería Química, U.M.S.N.H., 1999, p.p. 85.
- [23] Wang – Laihua, Lee, Hae – Geon y Hayes P., “Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal From Molten Steel by Flotation”, *ISIJ International*, Vol. 36, N° 1, 1996, p.p. 7 – 16.
- [24] Iguchi, M., “Continuous Measurements of Bubbles Characteristics in a Molten Iron Bath With Ar Gas Injection. *ISIJ International*, Vol. 34, N° 12, 1994, p.p. 980 – 985.
- [25] Iguchi, M., “Heat transfer Between Bubbling and Liquid During Cold Gas Injection”. *ISIJ International*, Vol. 32, N° 7, 1992, p.p. 865 – 872.
- [26] López – Ramirez, S., “Physical and Mathematical Determination of the Influence of Input Temperature Changes on the Molten Steel Flow Characteristics in Slab Tundishes”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 35B, 2004, p.p. 957 – 966.
- [27] O. J., Ilegbusi M. Iguchi, y W. Wahnstedlerl, *Mathematical and Physical Modeling of Materials Processing Operations*, Chpmanand Hall / CRC, 2000.

- [28] Sahai, Y. y Emi, T., "Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes", ISIJ International, Vol. 36, N°6, 1996, p.p 667 – 672.
- [29] Vargas – Zamora, A., "Heat and Mass Transfer of a Convective Stratified Flow in a Trough Type Tundish", Heat and Mass Transfer, 2003, p.p. 3028 – 3039.
- [30] Ramos – Banderas, "Mathematical Simulation and Modeling of Steel Flow With Gas Bubbling in Trough Type Tundishes, ISIJ International, Vol. 43, N° 5, p.p. 653 – 662.
- [31] Morales, R. D. "Numerical and Modeling Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer of Liquid Steel in a Tundish with Different Flow Control Devices", ISIJ International, Vol. 39, N° 5, 1999, p.p. 455 – 462.
- [32] Dipak, M. y Guthrie, I. L. R., "The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Tundish Systems", ISIJ International, Vol. 39, N° 6, 1999, p.p. 524 – 547.
- [33] Chakraborty, S. y Yogeshwar, S., "Effect of Varying Ladle Stream Temperature on the Melt Flow and Heat Transfer in Continuous Casting Tundishes", ISIJ International, Vol. 31, N° 9, 1991, p.p. 160 – 167.
- [34] Ilegbusi, O. J. y Szekely, J., "The Modeling of Gas Bubble Driven Circulations Systems" ISIJ International, Vol. 30, N° 9, 1990, p.p. 731 – 739.
- [35] Vargas – Zamora, A. y Barreto, J. de J., "Inertial Bouyancy Driven Water Flows Under Gas Bubbling and thermal Stratification Condition in a Tundish Model" Met. Trans. B, Vol. 35B, 2004.
- [36] Asish, K. S. y Yogeshwar, S., "Mathematical Modeling of Inclusion Transport and Removal in Continuous Casting Tundishes", ISIJ International, Vol. 33, N° 5, 1993, p.p. 556 – 566.

[37] Liefeng, Z. y Brian, G. T.” State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness”, ISIJ International, Vol. 43, N° 31, 2003, p.p. 271 – 291.

[38] C. M. Fan, y R. J. Shie, “Studies by Mathematical and Physical Modeling of Fluid Flow and Inclusion Removal Phenomena in Slab Tundishes of Casting Stainlees Steel Using Various Flows Control Devices Designs”, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 30, N° 5, 2003.

[39] Chandrashekhar, D. y Y. Sahai, “The effect on Tracer Density on Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes – A Model Study”, ISIJ International, Vol 35, N° 2, 1995, p.p. 163 – 169.

[40] Aguilar – Corona, A. “Thermal Stratification of Steel Flow in Tundishes with off Centred Ladle Shrouds Using Different Flow Control Designs”, Canadian Metalurgical Quarterly, Vol. 42, N° 4, 2003, p.p. 455 – 462.

[41] <http://en.Wikipedia.org>.

[42] <http://www.ac.www.edu>.

[43] R. E. Tylor, CINDAS Data Series on Materials Properties, Thermal Expansion of Solids, Vol. 1 – 4, ASM International, 1998.

[44] http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics.

[45] CRC Handbook of Chemistry and Physics, Editor and Chief David R. Lide, Former Director, Standard Reference Data National Institute of Standard and Technology, Editorial Advisory Board. 2005.

[46] <http://www.ajdesigner.com>.

[47] <http://em – ntserver.unl.edu>.

- [48] Perry, H. R., Chemical engineers Handbook, Seventh Edition, Mc Graw – Hill, 1998.
- [49] Levenspiel, O., Chemical Reactions Engineering, Chapter nine Non – Ideal Flow, Second Edition, Ed. John Wiley and Sons, Canada, 1972, p.p. 277 – 346.
- [50] Himmelblau, D. M. y Bischoff, K. B., Process Analysis and Simulation (Deterministic Systems), Chapter Four Population Balance Model, Ed. John Wiley and Sons, USA, 1968, p.p. 127 - 190.
- [51] Piskunov, N., Cálculo diferencial e Integral, Tomo I, Ed. Mir, 5ª Ed., 1980, p.p. 444.
- [52] Tutorial y Manual de Usuario de Fluent®.
- [53] Barrera, G., Apuntes del Curso Instrumentación y Control, Instituto de investigaciones metalúrgicas, U.M.S.N.H., 2004.
- [54] Tavera, F., Apuntes del Curso Procesamiento de Minerales, Instituto de investigaciones metalúrgicas, U.M.S.N.H., 2004.
- [55] Salas, A. Comportamiento de las inclusiones no metálicas en el molde de colada continua, Tesis de maestría en ciencias en metalurgia, I.T.M., 2006.

APÉNDICE I

CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO

A1.1.-

$V(l)$	$Q(l/s)$
26.16	0.0903

$$\bar{t} = \frac{V}{Q}$$

$$\bar{t} = \frac{26.16 \text{ l}}{0.0903 \text{ (l/s)}}$$

$$\bar{t} = 289.7 \text{ s}$$

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}}$$

$$\Theta = \frac{T - T_I}{T_F - T_I}$$

$$\bar{\theta}_T = \frac{\sum_{i=0}^2 \Theta_i \theta_i}{\sum_{i=0}^2 \Theta_i}$$

$$\frac{D}{\nu L} = \frac{(\bar{\theta}_T - 1)}{2}$$

$$T_\Theta = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta_i\left(\frac{D}{\nu L}\right)}} \exp\left[-\frac{(\bar{\theta}_T - 1)^2}{4\theta_i\left(\frac{D}{\nu L}\right)}\right]$$

$$\frac{Q_a}{Q} = \sum_{i=0}^2 T_{\Theta_i} \Delta \theta$$

$$\frac{V_{DE}}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} \cdot \bar{\theta}_T$$

$$\frac{V_{Pi}}{V} = \frac{(\theta_{\min} - \theta_{peak})}{2}$$

$$\frac{V_{Me}}{V} = 1 - \left(\frac{V_{Pi}}{V} + \frac{V_{DE}}{V} \right)$$

APÉNDICE II

MODELO $k - \varepsilon$ Y EULERIANO

A2.1.- Modelo $k - \varepsilon$.

El modelo $k - \varepsilon$ estándar es un modelo semiempírico basado en el modelo de las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y su velocidad de disipación (ε) el modelo de la ecuación de transporte k es derivada de la ecuación exacta, mientras el modelo para la ecuación de ε fue obtenido usando razonamientos físicos muy semejantes a su contraparte matemática exacta.

En la derivación del modelo $k - \varepsilon$ se asumió que el flujo es totalmente turbulento y el efecto de la viscosidad molecular es innegable. Por tanto el modelo $k - \varepsilon$ estándar es únicamente válido para flujos turbulentos.

Ecuaciones de transporte para el modelo $k - \varepsilon$ estándar

La energía cinética turbulenta k , y su velocidad de disipación ε , son obtenidas de las siguientes ecuaciones de transporte.

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

Donde:

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

En esta ecuación G_k representa la generación de la energía cinética turbulenta debido a los gradientes medios de velocidad. G_b es la generación de la energía cinética turbulenta debido a la flotación.

Y_M representa la contribución de las fluctuaciones de dilatación en la turbulencia compresible para la velocidad de disipación total. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ son constantes. σ_k y σ_ε son el número de Prandtl turbulento para $k - \varepsilon$ respectivamente. S_k y S_ε son definidas por el usuario.

Modelo de la viscosidad turbulenta

La viscosidad turbulenta o Eddy μ_t , es calculada y combinada con k y ε como sigue:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Donde C_μ es constante.

Constantes del modelo

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

A.2.2.- Modelo Euleriano.

Para cambiar el modelo de una fase donde un solo punto de la ecuación de conservación para el momento, la continuidad y la energía (opcional) se calcula para un modelo multifase, adicionalmente los puntos de la ecuación de transformación deben ser introducidos. En el proceso de introducción de puntos adicionales de la ecuación de conservación, el punto adicional debe ser modificado. Las modificaciones involucran, entre otras cosas, la introducción de las fracciones de volumen $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ para fases múltiples así como el mecanismo para el cambio de momento, calor y masa entre las fases.

Para detalles más específicos del modelo $k - \varepsilon$ y Euleriano ver la referencia [52].