



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

***“MODELADO FÍSICO DEL MEZCLADO QUÍMICO EN  
DISTRIBUIDORES DE COLADA CONTINUA DEL  
ACERO”***

**TESIS**

**QUE PRESENTA:**

**VERÓNICA DELGADO ÁLVAREZ**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**Tutor: Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez**



**Ciudad Universitaria, CDMX**

**2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Índice

Resumen .....	1
Capítulo 1. Introducción .....	2
1.1. La importancia de la siderurgia .....	2
1.2. Rutas para la producción de acero .....	3
1.3. El distribuidor de colada continua .....	5
1.4. Modelado físico .....	6
1.4.1. Similitud geométrica .....	7
1.4.2. Similitud dinámica .....	7
1.4.3. Similitud cinemática .....	9
1.5. Curvas RTD .....	9
1.5.1. Función de pulso .....	10
1.5.2. Función escalón .....	13
1.6. Técnicas experimentales para medir los RTD .....	14
1.6.1. Turbidimetría .....	14
1.7. Revisión de la literatura .....	15
1.7.1. Artículos del autor Mazumdar, D. [8][9][10] .....	16
1.7.2. Artículo de Koitzsch R. [13] .....	18
1.8. Hipótesis .....	21
1.9. Objetivos .....	21
Capítulo 2. Metodología .....	22
2.1. Koitzsch como referencia para el trabajo presente .....	22
2.2. Construcción del sistema para el modelo físico .....	28
2.2.1. Base de la bomba y rotámetro .....	29
2.2.2. Mesa elevadora .....	33
2.2.3. Buza .....	35
2.2.4. Sostén de la buza .....	37
2.3. Etapa experimental .....	39
2.3.1. Calibración del equipo para turbidimetría .....	41
2.3.2. Preparación del trazador .....	43
2.3.3. Experimento de turbidimetría .....	44
2.3.4. Obtención de curvas C .....	45
2.3.5. Porcentaje de volumen muerto, volumen pistón y volumen mezclado .....	47
Capítulo 3. Resultados y Discusión .....	48
Capítulo 4. Conclusiones .....	62
Capítulo 5. Bibliografía .....	63
Capítulo 6. Apéndices .....	65
6.1. Lista de figuras .....	65
6.2. Lista de tablas .....	67

## Resumen

En este trabajo se construyó con materiales de bajo costo, un sistema completo, desarmable, transportable y modificable que permitió operar y simular el proceso de colada continua en un modelo físico de un tundish de acrílico escalado 1:3 de 1 y 2 hilos de salida, esto con el fin de estudiar el mezclado químico dentro de estos reactores que son parte fundamental para la refinación secundaria del acero a nivel industrial.

Para el estudio del mezclado químico dentro del distribuidor se utilizó la técnica de turbidimetría, de la cual se obtuvieron curvas RTD o curvas C que permitieron, a través de ecuaciones diferenciales, el cálculo del porcentaje de volumen de líquido que se mezclaba dentro del reactor, lo cual está directamente relacionado con la homogeneización química y limpieza del baño a nivel industrial. Con los resultados obtenidos en este trabajo, se espera que los modelos matemáticos que se desarrollan en otros trabajos de manera paralela se puedan validar, además también se espera que a construcción de este sistema sirva para ampliar el estudio del mezclado químico agregando otras variables que afecten el proceso, así como otras líneas de investigación relevantes a nivel escolar e industrial en los distribuidores de colada continua.

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. La importancia de la siderurgia

La siderurgia es el proceso en el cual se transforma el mineral y/o chatarra de hierro para obtener como producto final acero en forma de barras, laminas o planchones, tochos y varillas [1]. El acero es una aleación compuesta fundamentalmente de hierro-carbono, donde el carbono no supera el 2.14% de la composición; el acero puede contener otros elementos aleantes los cuales modifican sus propiedades y por ende sus aplicaciones. La importancia del acero a nivel mundial como material se fundamenta en una gran variedad de parámetros, pero los más relevantes son:

- **Bajo costo de producción:** Al provenir de un mineral de alta ley tan abundante en la corteza terrestre el cual tiene una gran facilidad de reducción, a comparación de otros minerales, su producción se considera de bajo costo frente a otras aleaciones de importancia en el mercado global [1].
- **Elevadas propiedades mecánicas:** Los aceros poseen un sinfín de clasificaciones donde las propiedades mecánicas varían, pero en general, los aceros poseen una alta resistencia (estática y dinámica), dureza, tenacidad, ductilidad y otras elevadas propiedades mecánicas a comparación de otros materiales y aleaciones metálicas [1].
- **Posibilidad de modificar propiedades:** Las propiedades mecánicas y físicas del acero pueden ser fácilmente modificadas a conveniencia mediante tratamientos térmicos y termoquímicos [1].
- **Usos y aplicaciones:** El acero es el material metálico más producido en todo el mundo. Sus aplicaciones van desde los sectores más básicos como el alimenticio, hasta los más complejos como los de desarrollo de ciencias y tecnologías. La mayoría de los componentes a nuestro alrededor poseen acero [2].

Como ya se mencionó anteriormente, el hierro representa el 5% de la superficie terrestre, lo que lo hace uno de los elementos más abundantes del planeta, y por ende, su procesamiento para generar acero no es solo altamente rentable, sino

indispensable. Según la World Steel Association, en el 2016 el 40% de la producción anual de acero a nivel mundial se destinó a la infraestructura, poco más del 15% al sector de transportes, 20% al sector automovilístico, poco más del 4% a la producción de alimentos, 8% a equipos y maquinaria, 7% a la producción y distribución de energías, mientras que el menos del 5% restantes, se destinó a los sectores sobrantes.

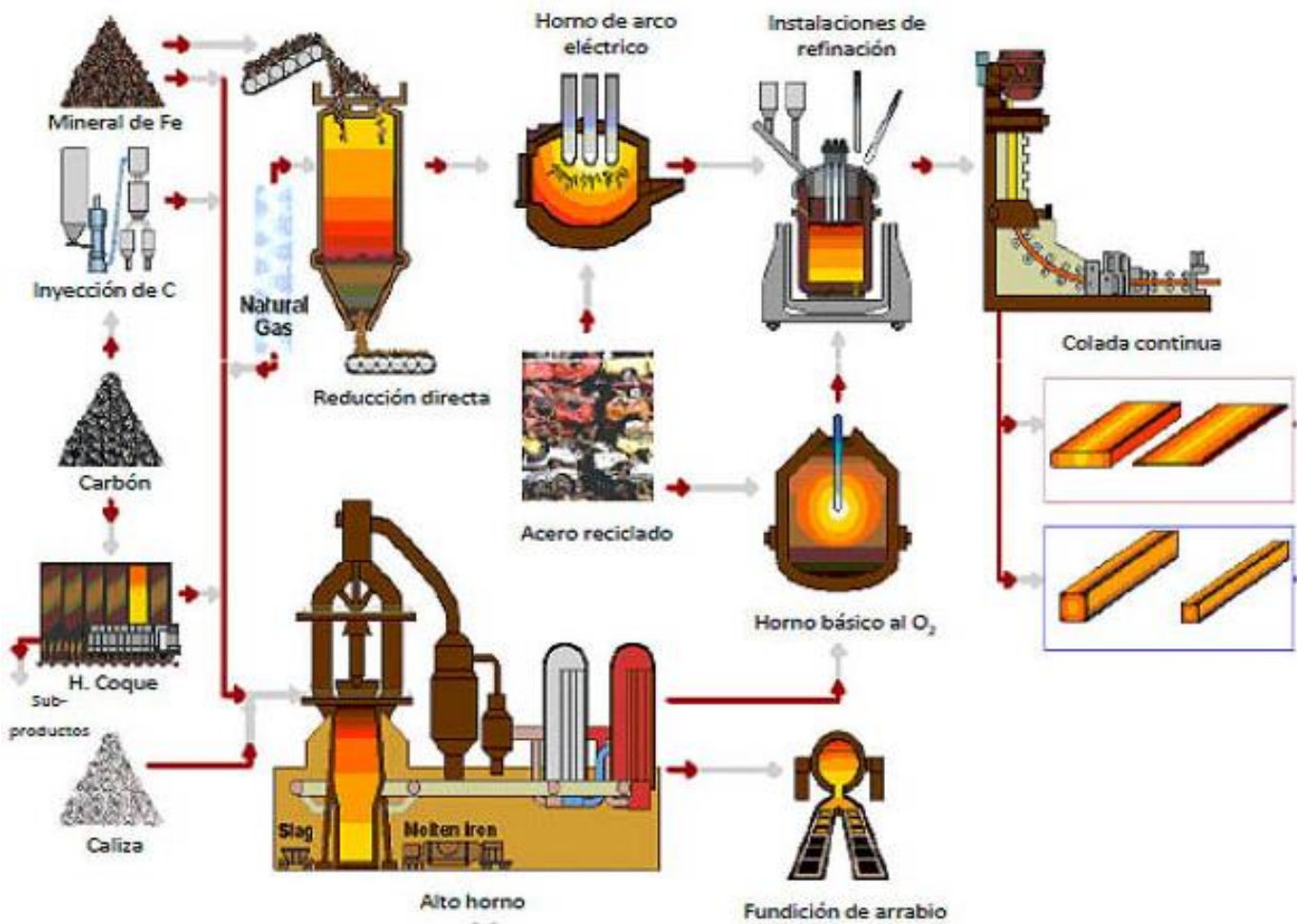
Sin acero, la vida como la conocemos actualmente no podría ser concebida. Como ya se vio previamente, dicha aleación representa una gran importancia en la actividad humana, y debido a la creciente demanda cada día de mejores piezas de dicho metal, la siderurgia y el mejoramiento de cada una de sus etapas es crucial para una producción de acero con mayor calidad metalúrgica.

## **1.2. Rutas para la producción de acero**

En la industria siderúrgica existen 2 rutas para producir acero: La ruta integrada y la ruta directa [1][3].

La ruta integrada inicia con el mineral de hierro como materia prima. Una vez que el mineral es tratado (concentrado y pelletizado), puede pasar a través de un alto horno o de un horno de reducción directa, ambos reactores, reducen el mineral en hierro metálico. En el caso del alto horno se obtiene como producto arrabio, una fundición de hierro saturada de carbono, este arrabio se pasa a un horno BOF, donde a través de unas lanzas de inyección de oxígeno, el arrabio se oxida eliminando del baño metálico el exceso de carbono, transformándose finalmente en acero. El acero producido es llevado a un horno olla donde se refina, es decir, se eliminan inclusiones y elementos residuales no deseados que afectan directamente la calidad del acero. Finalmente, el metal líquido pasa al proceso de colada continua donde se solidifica. Por otro lado, si se usa un horno de reducción directa se obtiene como producto hierro esponja, una fundición de hierro muy porosa; el hierro esponja pasa a un horno de arco eléctrico donde se funde y se eliminan los excesos de carbono, transformándose así en acero. Por último, al igual que en el alto horno, dicho acero pasa a través de un horno olla y del proceso de colada continua [3].

La ruta directa usa como materia prima chatarra de hierro y acero, producto del reciclado. Esta chatarra pasa directo a un horno de arco eléctrico, el cual elimina los excesos de carbono, dicho paso es conocido en esta ruta como refinación primaria. La refinación secundaria se lleva a cabo en el horno olla, que al igual que en la ruta integrada, elimina inclusiones y elementos residuales. Finalmente, el baño líquido de acero pasa a la colada continua para su solidificación [3]. Ambas rutas para la producción de acero se pueden ver esquematizadas en la **Figura 1**.



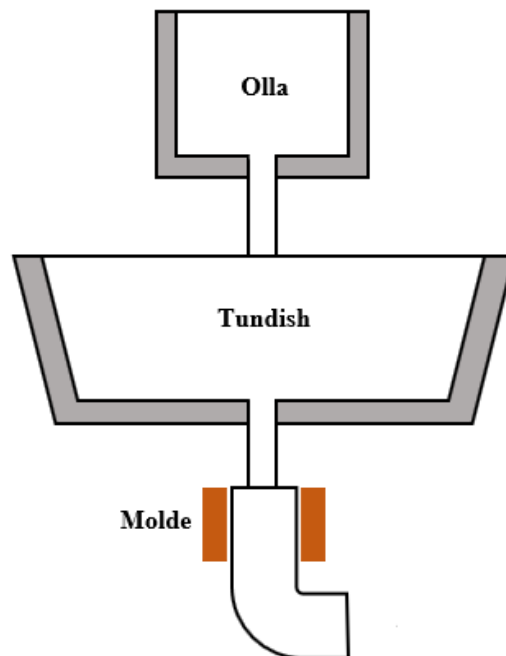
**Figura 1.** Esquema de las rutas de producción del acero [3]

### 1.3. El distribuidor de colada continua

La colada continua, como ya lo vimos anteriormente, es el último paso en la producción del acero. Se trata del proceso que permite el control continuo de la transformación del metal líquido a altas temperatura, a un metal sólido como producto semiterminado. Los reactores principales en la colada continua son: olla, distribuidor o tundish y moldes de solidificación.

Hace un par de años, se pudo medir el tiempo de mezclado en modelos físicos de ollas de acero agitadas con gas, el cual, es el proceso de refinación del acero más estudiado. En esta ocasión se pretende extender el estudio a otro reactor como lo es el distribuidor de colada continua o “tundish”.

Un tundish es un contenedor con salidas en su parte inferior. Se trata de un reactor intermedio, el cual es alimentado por una olla de aceración, y cuya función es proveer de manera dosificada acero líquido a los moldes de colada continua [4] tal como se muestra en la **Figura 2**. El tundish opera a una profundidad de baño metálico constante, de tal manera que el metal fundido permanece dinámicamente estable, proporcionando un flujo constante y controlado al molde de solidificación.



**Figura 2.** Esquema general del acomodo de los reactores en la colada continua



El acero cada día se encuentra sometido a mejoras en la calidad de su composición debido a sus aplicaciones, es por eso que, en las últimas décadas, un gran número de investigadores han estudiado de manera más profunda el papel de los distribuidores en diversas operaciones de gran importancia industrial para la limpieza del acero, como lo son: La separación y flotación de inclusiones en el metal líquido, ajuste de la aleación, prevención de la reoxidación y la homogenización química y térmica del baño metálico. Por ende, en la actualidad un tundish puede fungir como un reactor secundario para la refinación de acero durante el proceso de la colada continua [8]. Todas estas operaciones y su eficiencia están generalmente gobernadas por los transportes de masa y energía asociados a la dinámica de fluidos del acero dentro del tundish, por lo que conocer parámetros como los patrones de flujo promovido por los componentes dentro del fluido, la turbulencia, tiempos de residencia, entre otros, son primordiales para el análisis y la optimización de las operaciones de interés. Dicho análisis se puede llevar a cabo caracterizando el nivel de mezclado dentro de este reactor. De manera tradicional, se analiza el mezclado químico en reactores continuos con la determinación de curvas RTD (Residence Time Distribution) a través de modelado físico o matemático.

#### **1.4. Modelado físico**

Un modelo físico es la representación aproximada de un proceso o sistema real utilizando otros materiales que cumplan criterios de similitud con el proceso real. Los modelos físicos son una gran herramienta para entender lo que pasa dentro de un reactor y así poder estudiar la dinámica de fluidos y los fenómenos de transporte. El estudio de estos parámetros dentro del modelo físico permite controlar, diseñar, predecir y analizar una posterior optimización o mejora del proceso en cuestión [15]. Las mediciones experimentales que se logran obtener de los modelos físicos generalmente sirven para validar modelos matemáticos, los cuales luego se aplican a reactores con acero con el fin de entender, controlar y optimizar propuestas a plantas industriales que así lo requieran. Si los modelos matemáticos no pueden validarse con resultados experimentales obtenidos mediante modelos físicos, estos no pueden llevarse a cabo a niveles industriales [15].

Esta tesis se centrará en la puesta en operación de un modelo físico a escala de un tundish de 1 y/o 2 hilos, y una vez operando con normalidad, el aparato experimental servirá en el estudio del mezclado químico dentro de un tundish mediante modelado físico. Para poder simular el proceso industrial con un modelo físico, es necesario cumplir con parámetros de similitud que gobiernan el proceso que se quiere representar. Los procesos fluidinámicos como este, deben cumplir con criterios de similitud geométricos, dinámicos y cinemáticos.

### 1.4.1. Similitud geométrica

La similitud geométrica como su nombre lo dice, significa similitud en forma. Dos sistemas pueden poseer la misma forma, pero tener diferentes dimensiones. Para lograr una similitud geométrica se utiliza el factor de escala y se representa por el símbolo adimensional  $\lambda$ , se trata de un valor que debe tener como mínimo, el mismo número de dígitos significantes que las medidas y coordenadas originales para poder escalar y representar mediante modelos físicos de tamaños ‘pequeños’, sistemas industriales de varias toneladas [15].  $\lambda$  esta dado por:

$$\lambda = \frac{L \text{ característico del modelo}}{L \text{ característico del reactor}} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 1)}$$

Siendo  $L$  [m] la longitud hidráulica [15].

### 1.4.2. Similitud dinámica

La similitud dinámica nos habla de las fuerzas que actúan y gobiernan la dinámica de fluidos del sistema a estudiar, como la gravedad, las fuerzas viscosas, inercia, boyantes, entre otras; estas fuerzas deben ser iguales o muy cercanas entre ambos sistemas, el real y el modelo físico, y están representadas mediante números adimensionales. Un proceso fluidinámico real involucra mecanismos de transferencia de masa, de energía o ambos, volviéndolo complejo, por lo que, durante un modelado físico es prácticamente imposible alcanzar la similitud dinámica en su totalidad. En estos casos solo se toman en cuenta las variables más importantes del proceso para resolver el modelo [15].

En un tundish, las fuerzas que gobiernan al sistema son las gravitacionales y las inerciales, por lo que los números adimensionales a considerar son el número de Reynolds (Re), que es la relación entre fuerzas inerciales y viscosas, y el número de Froude (Fr), que es la relación entre fuerzas gravitacionales y las inerciales [15]. La similitud dinámica se alcanza cuando se cumple lo siguiente:

$$Re_{sistema} = Re_{modelo} \dots\dots\dots (Ecuación 2)$$

$$Fr_{sistema} = Fr_{modelo} \dots\dots\dots (Ecuación 3)$$

El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} \dots\dots\dots (Ecuación 4)$$

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \dots\dots\dots (Ecuación 5)$$

Donde  $\rho \frac{[Kg]}{[m^3]}$  es la densidad del líquido,  $V \frac{[m]}{[s]}$  es la velocidad característica del líquido,  $L [m]$  es la longitud característica del reactor, y  $\mu \frac{[Kg]}{[m \cdot s]}$  es la viscosidad dinámica del líquido.

Mientras que el número de Froude se define como:

$$Fr = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas gravitacionales}} \dots\dots\dots (Ecuación 6)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \dots\dots\dots (Ecuación 7)$$

Donde  $V \frac{[m]}{[s]}$  es la velocidad característica del líquido,  $g \frac{[m]}{[s^2]}$  es la fuerza de gravedad, y  $L [m]$  es la longitud o profundidad hidráulica, la cual está dada por:

$$L = \frac{A}{T} \dots\dots\dots (Ecuación 8)$$

Donde  $A [m^2]$  es el área del trapecio, y  $T [m]$  es el ancho superficial del reactor.

### 1.4.3. Similitud cinemática

La similitud cinemática implica que las velocidades del prototipo son semejantes a las del modelo físico, pero en la práctica esta se logra satisfaciendo la similitud dinámica y usando un fluido en el modelo con la misma viscosidad cinemática ( $\nu$ ), una propiedad intrínseca de los líquidos a fluir. Durante un estudio de modelado físico, se deben usar líquidos con viscosidades cinemáticas similares al líquido de estudio para asegurar un movimiento similar bajo fuerzas equivalentes. En los procesos que trabajan con acero, sus modelos físicos correspondientes utilizan agua, ya que su viscosidad cinemática a 20°C ( $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) es similar que la del acero a 1600°C [15]. La viscosidad cinemática está dada por:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 9)}$$

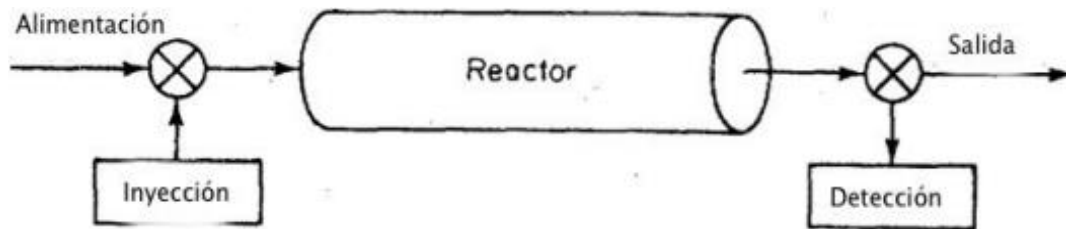
Donde  $\mu$  [ $\frac{\text{Kg}}{\text{m}} \cdot \text{s}$ ] es la viscosidad dinámica del líquido y  $\rho$  [ $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ] es la densidad del líquido.

### 1.5. Curvas RTD

Las curvas RTD son la descripción gráfica de la distribución de probabilidad que determina aproximadamente la cantidad de tiempo que un solo elemento de fluido puede pasar dentro de un reactor [8][9]; a este tiempo se le conoce como ‘tiempo de residencia’. Estas curvas ayudan a caracterizar el mezclado dentro de un reactor, las cuales permiten comparar la conducta de un fluido experimental (en un modelo físico), con sus respectivos modelos teóricos individuales (modelos matemáticos y simulaciones numéricas); por lo tanto, a nivel industrial son útiles no solo para solucionar problemas de operación dentro de un reactor ya existente, sino que también sirven para estimar eficiencias y mejoras en futuros reactores [10].

Su estudio se basa en que el sistema continuo de flujo se encuentra en estado estacionario. Experimentalmente las curvas RTD se pueden medir por diversas técnicas como lo son: Colorimetría, conductimetría, espectrofotometría, pH-metría, turbidimetría y más recientemente por PLIF, entre otras. Esta medición consiste en

la inyección de un trazador en la corriente que entra al reactor en un tiempo cero ( $t = 0$ ), para posteriormente ir supervisando la concentración ( $C$ ) del trazador a la salida del reactor a medida que el tiempo transcurre. Un esquema general de esta medición y su estudio se puede observar en la **Figura 3** [6][11]. A partir de estas mediciones se puede obtener la variación de las concentraciones de salida en función del tiempo (Curvas  $C$  y curvas  $F$ ) [3].

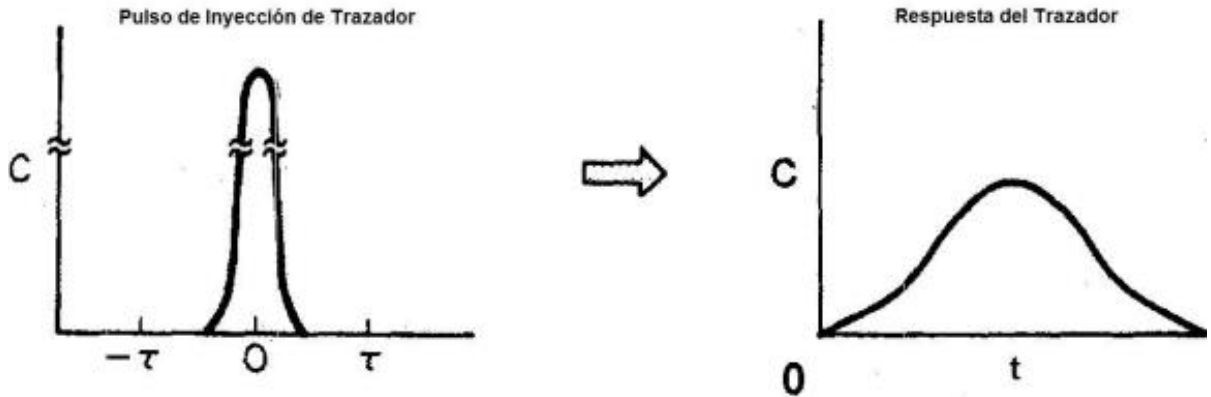


**Figura 3.** Esquema para la medición de curvas RTD en un reactor estacionario [6][11]

El trazador debe cumplir con ciertas características físicas y químicas como: Ser completamente soluble en el fluido, ser inerte, no absorberse en las paredes o cavidades del reactor y no debe modificar ninguna condición hidrodinámica. En general, la inyección del trazador se hace mediante la función de pulso para obtener las curvas  $C$ , o la función escalón si se busca obtener curvas  $F$ .

### 1.5.1. Función de pulso

Este método requiere la introducción de un volumen muy pequeño de trazador concentrado en el caudal de entrada al reactor [7]. La entrada de este trazador se debe dar a través de una sola inyección súbita, es decir, en un diferencial de tiempo muy pequeño ( $\Delta t$ ) para que la concentración del trazador sea lo más constante posible a través de todo el modelo. Una vez inyectado el trazador, se toman muestras a diferentes tiempos de las concentraciones de salida, y la respuesta de estos datos da como resultado una curva RTD de concentración vs tiempo, denominadas típicamente como curvas  $C$  [6], donde es posible obtener el tiempo de residencia y otros datos de interés para entender y cuantificar el grado de mezclado de un reactor. La respuesta a esta función de pulso se puede observar en la **Figura 4**.



**Figura 4.** Respuesta a la inyección de un pulso de trazador en un reactor con entrada y salida única [6][11]

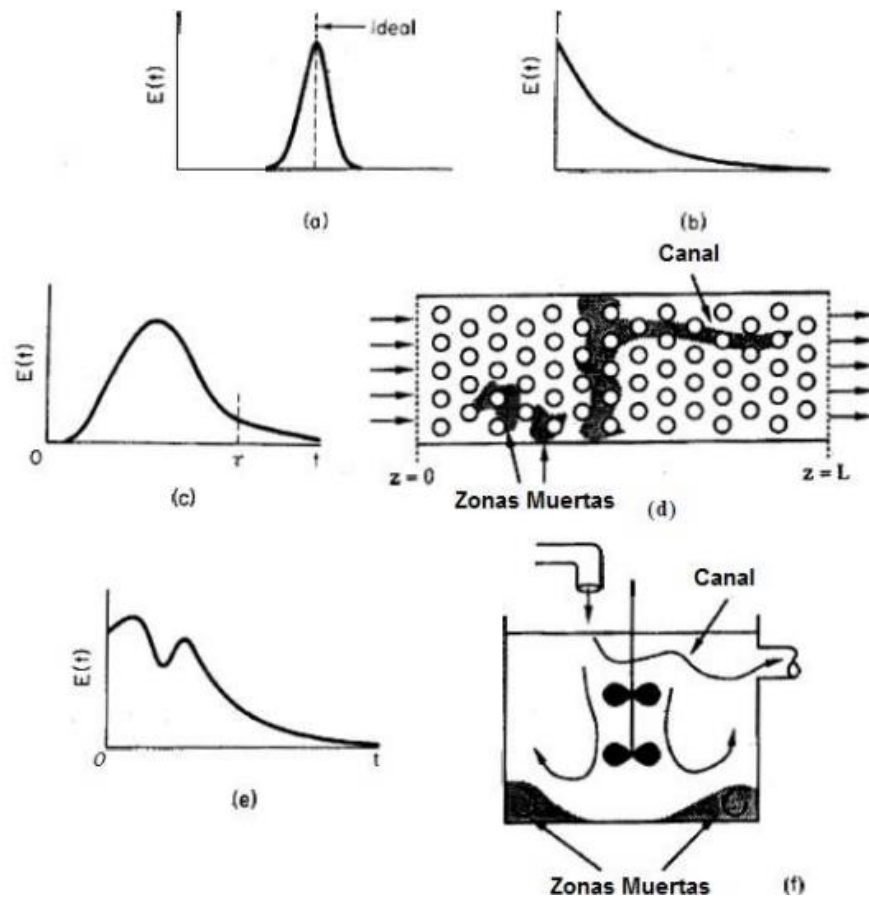
La forma integral para la interpretación del tiempo de residencia es:

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 10)}$$

Donde  $E(t)$  es la función de distribución de tiempos de residencia. Esta función es la más utilizada de las funciones de distribución relacionadas con el análisis de mezclado en reactores debido a que caracteriza los periodos de tiempo de diferentes átomos que pasan a través de un reactor en condiciones de mezclado.

Este modelo de función de pulso en la curva RTD posee 2 comportamientos de mezclado definidos por el tipo de flujo que se presenta en el reactor:

- Flujo pistón: Es cuando la salida súbita de todo el trazador se da después de un tiempo promedio de residencia, lo que implica que no se produce ninguna mezcla del material mientras se mueve por el reactor.
- Flujo de mezclado perfecto: Es cuando todo el trazador se mezcla instantáneamente en el seno de la carga desde el tiempo cero que es inyectado; y su concentración en la salida es la composición de equilibrio al primer tiempo, para después ir disminuyendo exponencialmente con el paso del tiempo, lo que indica una mezcla completa y perfecta.



**Figura 5.** Tipos de curvas 'C' más comúnmente obtenidas [6][11]

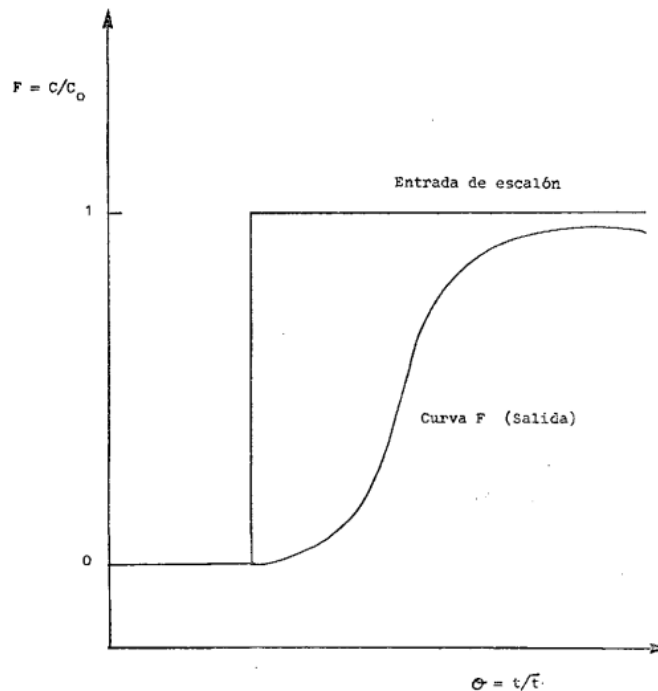
La **Figura 5** [6][11] muestra las curvas 'C' más comunes; en el inciso a) se tiene una curva 'C' que representa un flujo pistón, un comportamiento donde no existe mezclado. Para el inciso b) se tiene la representación de un flujo perfectamente mezclado, donde el dispositivo mezclará todo el soluto instantáneamente. Ambos comportamientos, es decir, flujo pistón y flujo mezclado son opuestos y he idealizados. En el inciso c) se nos muestra un comportamiento mixto, es decir la presencia de un porcentaje de flujo pistón, flujo mezclado y la presencia de zonas muertas, el inciso d) esquematiza zonas que representan lugares dentro del reactor donde el tiempo de residencia es mayor al tiempo de residencia promedio. En el inciso e) se pueden observar dos puntos máximos, lo que indica algún tipo de recirculación y la presencia de zonas muertas, por último, el inciso f) muestra las zonas de fluido macroscópico estancado, o también conocidas como zonas muertas.

### 1.5.2. Función escalón

En un experimento en escalón, el trazador se inyecta lentamente en la entrada del caudal, por lo que la concentración del trazador a la entrada cambia abruptamente en un tiempo dado. La concentración del trazador a la salida se mide y se divide entre la concentración  $C_0$ , la cual es la concentración del trazador si estuviese uniformemente distribuido en todo el tanque, para así obtener la una curva F; esta curva proporciona datos como el tiempo de residencia y el flujo medio del caudal. Los valores en las curvas F siempre estarán dados entre 0 a 1 como se muestra en la **Figura 6** [12].

La forma integral de la función escalón es:

$$\int_0^{\infty} C(\theta) d\theta = 1 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 11)}$$



**Figura 6.** Esquema general de una Curva 'F' [9]

Donde  $C(\theta)$  es la concentración de referencia en el experimento. Tanto las curvas de la función de pulso (Curvas C), como las de función escalón, reportan las concentraciones y tiempos de forma adimensional para un mejor análisis de los resultados.



## **1.6. Técnicas experimentales para medir los RTD**

Como ya se mencionó previamente, las curvas RTD para determinar el tiempo de residencia de un elemento diferencial de un fluido dentro de un reactor (Modelo físico escalable del reactor en cuestión), se pueden medir experimentalmente mediante varias técnicas. De estas técnicas dependerá el tipo de trazador a usar, ya que del trazador podemos medir propiedades como la concentración de un determinado catión, la conductividad eléctrica, la absorción de la luz, la radioactividad, la fluorescencia, la turbidez, entre otras. Para este trabajo de tesis, la técnica que se usó para determinar la curva RTD de un modelo escalado de tundish fue turbidimetría.

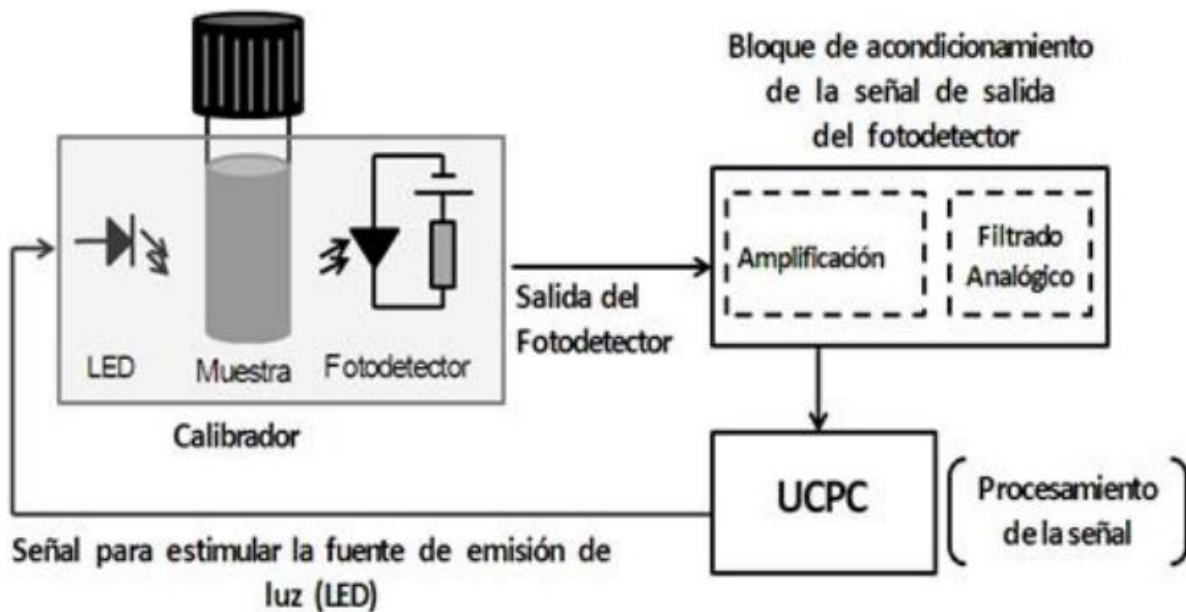
### **1.6.1. Turbidimetría**

Las técnicas ópticas de medición se utilizan para obtener cierta información de un objeto, estas técnicas implican la interacción de la luz con un medio. Al atravesar una muestra el haz luminoso, pueden ocurrir muchos fenómenos, como la absorción, la fluorescencia o la dispersión que, junto a las propiedades ondulatorias como la amplitud, fase, polarización, longitud de onda, ofrecen una gran cantidad de información, una de las muchas técnicas ópticas de medición es la turbidimetría [16][17].

La turbidimetría se define como el proceso que mide la pérdida de intensidad de luz transmitida debido a la dispersión de partículas suspendidas en un fluido, por lo que la turbidimetría se encarga de medir la turbidez que existe en un fluido, o en otras palabras, la reducción de la transparencia de un líquido causada por la presencia de partículas no disueltas de material distinto al propio fluido [16][18].

Esta técnica se lleva a cabo con ayuda de un equipo llamado turbidímetro. La solución problema se introduce en un embace de vidrio propio del turbidímetro, este se ingresa al equipo en una cavidad para la lectura de turbidez, la cual se cierra para no dejar pasar luz exterior que pueda interferir en la medición. Al comenzar la medición se dispara un haz de luz que pasa a través de un filtro creando una longitud de onda conocida, la cual atraviesa el embace que contiene la solución problema.

Una célula fotoeléctrica recoge la luz que pasó a través del embace. Luego se da una medida para la cantidad de luz absorbida en unidades de NTU (Nephelometric Turbidity Unit o en español Unidad Nefelométrica de Turbidez) y con una curva de calibración que correlaciona las NTU con la concentración de soluto dentro de la solución, se puede determinar la concentración de la muestra contenida en el embace. El esquema general de un ensayo de turbidimetría se puede observar en la **Figura 7** [16].



**Figura 7.** Esquema general de un sistema para medir la turbidez [16]

## 1.7. Revisión de la literatura

Aunque las investigaciones en las últimas décadas de los distribuidores de colada continua como reactores secundarios para la limpieza y obtención de acero de mejor calidad, cada día aumenta, su estudio en comparación a otros reactores dentro de la industria siderúrgica sigue siendo reducida. Esta tesis pretende poner en marcha el arreglo experimental de un modelo físico de un tundish, pero también y para probar el éxito de dicho arreglo, se quiere estudiar el mezclado químico en un modelo físico de un tundish por la técnica de turbidimetría mencionada en el apartado anterior. Para esto se han revisado a detalle 4 de los artículos de

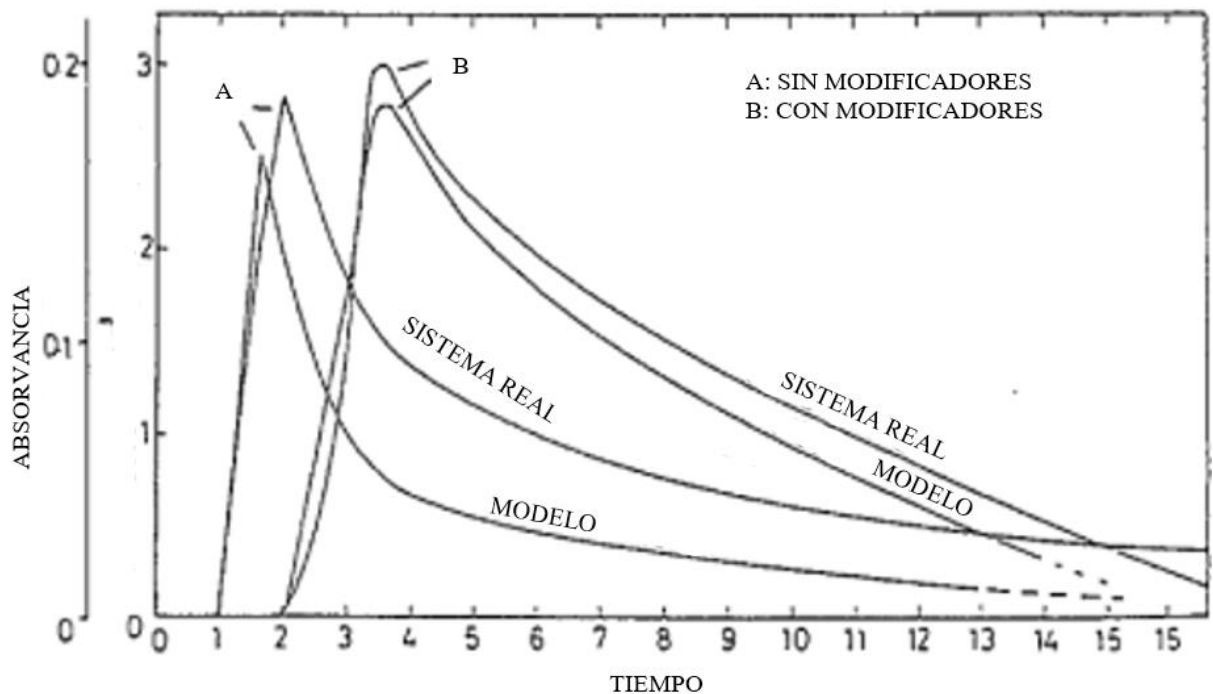
investigación más representativos en los últimos años para el estudio de los distribuidores de colada continua. Tres de estos artículos son del autor Dipak Mazumdar y colaboradores, que desde 1970 hasta el 2019, se han dedicado a recopilar y resumir las técnicas más novedosas para medir diversas propiedades de interés industrial, así como sus resultados, en los distribuidores de colada continua. Este tipo de artículos se conocen como revisiones (reviews) en donde se presentan de manera crítica todas las investigaciones relevantes en el tema. Estas revisiones son valiosas ya que clasifican, analizan y dan las tendencias en cuanto a la investigación de un tema, en este caso, los distribuidores de la colada continua del acero. El cuarto artículo es trabajo del autor Roger Koitzsch y colaboradores. Ellos estudian específicamente el mezclado químico en un modelo físico de un tundish mediante las técnicas más novedosas actualmente: PIV en conjunto con PLIF, un trabajo de investigación único en su clase. Este último artículo de investigación sirvió de guía para plantear el trabajo experimental de la presente tesis.

### **1.7.1. Artículos del autor Mazumdar D. [8] [9] [10]**

Sus tres artículos publicados, son revisiones del estado del arte y se encuentran divididos en 3 secciones: Estudios en modelos físicos, estudios en modelos matemáticos y estudios combinados de modelación física y matemática. Aunque sus 3 artículos publicados siguen el análisis de la literatura rigurosamente con la misma división en cada década analizada, es decir, contienen estas 3 secciones ya mencionadas, su artículo "The Physical and Mathematical Modelling of Continuous Casting Tundish Systems" de 1999, es el que contiene más información de modelado físico en distribuidores de colada continua, tema específico de esta tesis.

Los diversos modelos físicos que presenta en sus artículos fueron hechos con sistemas transparentes de acrílico y haciendo uso de agua como fluido de simulación del acero. Se usaron los criterios de similitud geométrica, cinemática y dinámica para el ejercicio conceptual de la creación de los modelos físicos. En este último criterio, similitud dinámica, como ya se revisó anteriormente, involucra a los números de Reynolds y Froude. Si se busca satisfacer plenamente la similitud dinámica entre un sistema real y un modelo físico, es decir, ambos números

adimensionales, Mazumdar y sus colaboradores encontraron que era necesario un modelo de escala completa, lo que era en muchos casos imposible, ya que los tundish que se encuentran en las industrias siderúrgicas, son de enormes dimensiones, conteniendo varias toneladas de acero. Al realizar modelos escalables y geoméricamente iguales, los autores encontraron que, con solo satisfacer los criterios de Froude, se podían tener resultados muy similares entre los sistemas reales y sus respectivos modelos físicos, tal como se muestra en la **Figura 8** [8].



**Figura 8.** Curvas C medidas experimentalmente en un modelo acuoso de un tundish a escala reducida y prototipo del sistema real a escala completa con y sin modificadores de flujo [8]

El modelado físico se usó desde los primeros estudios para determinar el desempeño de los tundish, es decir, su habilidad para eliminar inclusiones y proveer un chorro de acero estable al molde de colada continua con temperatura y limpieza adecuadas. Este desempeño se basó en la determinación de curvas RTD y en la determinación cuantitativa del porcentaje de flujo pistón y flujo mezclado [9].

De igual manera se evaluó el desempeño de los distribuidores con distintas formas, diversos tipos de modificadores de flujo y más recientemente el uso de cortinas de gas, así como el análisis de patrones de flujo, velocidad y turbulencia mediante PIV. Una de las conclusiones más puntuales que hacen en estos artículos a lo largo de las décadas, es la importancia de los modelos físicos, ya que estos sirven para comprender los fenómenos de transporte en un tundish, además de validar las simulaciones numéricas, que, a partir del siglo XXI, fueron tomando más relevancia e impacto debido a los avances computacionales y su accesibilidad [10].

### **1.7.2. Artículo de Koitzsch R. [13]**

En la actualidad es la única investigación cuantitativa que estudia el mezclado químico en un modelo a escala 1:3 de un distribuidor de colada continua industrial de un solo hilo, utilizando las técnicas PIV-PLIF de forma combinada. Midieron las velocidades del flujo del agua en diferentes planos de lámina ligera (300 mm y 1100 mm) así como la variación del campo de concentración dependiente del tiempo. Para la técnica convencional de PIV usaron como trazadores partículas de poliamida, y para PLIF una solución de rodamina como colorante fluorescente.

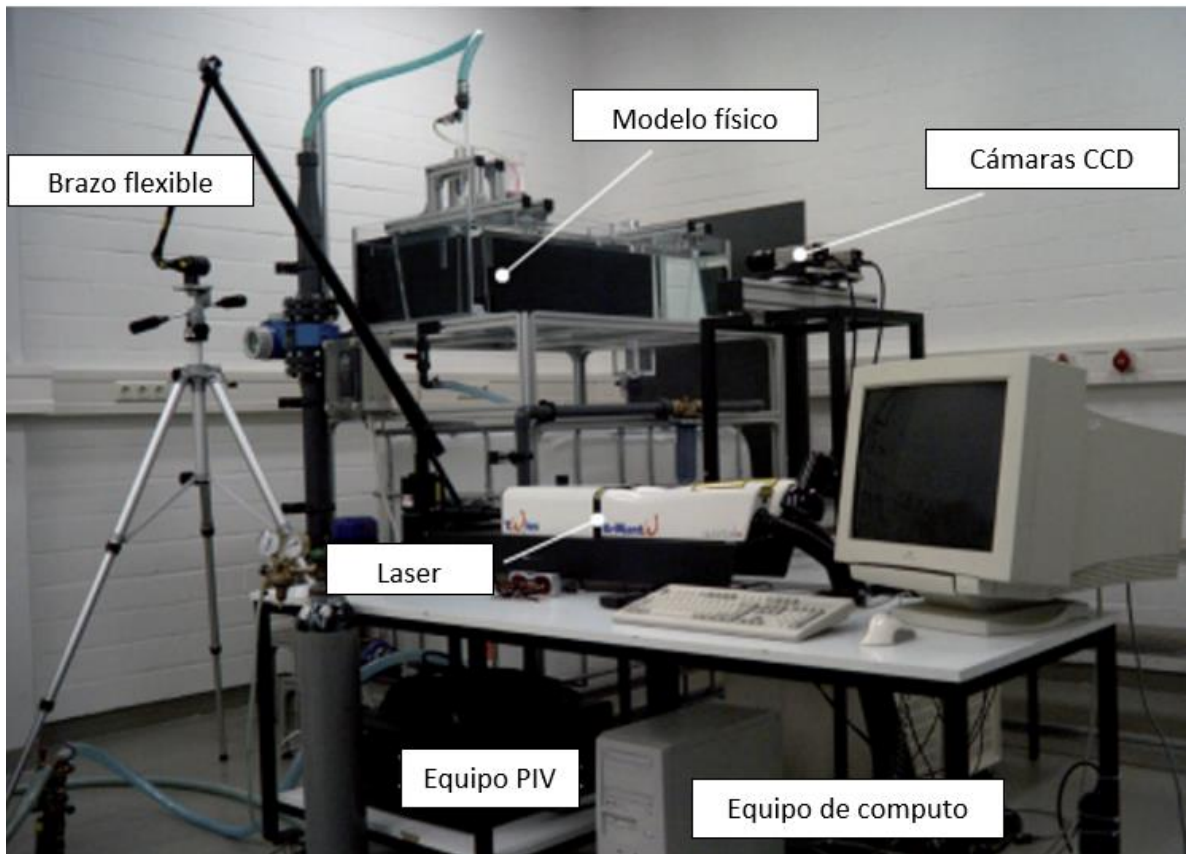
Al igual que Mazumbar y sus colaboradores, Koitzsch al escalar su modelo no pudo satisfacer en su totalidad la similitud dinámica. El tundish industrial del cual se basó el modelo de Koitzsch, operaba con un Reynolds de 10380, mientras que su modelado físico se llevó a cabo con un Reynolds de 5000. Koitzsch y sus colaboradores explican que no se podía usar el Reynolds original del sistema industrial, ya que las velocidades de flujo eran demasiado altas, provocando amplitudes de onda superficiales en el modelo escalado, debido a esto, solo pudieron cumplir con la similitud de Froude.

Anteriormente para analizar el nivel de mezclado dentro de un reactor, solo se podía hacer mediante curvas RTD tradicionales, donde no se sabía con precisión lo que estaba sucediendo dentro del modelo, debido a que no se tenía un mapa completo de la distribución de las velocidades del fluido dentro del reactor escalado; este artículo al trabajar con la técnica PIV-PLIF, muestra estos patrones de velocidades, por ello, su experimento pudo demostrar que el proceso de mezcla se correlaciona

con el patrón de flujo estacionario, asimismo, determinaron que el tiempo de residencia de algunas regiones en el modelo es significativamente más largo que el tiempo medio de residencia, lo que indica la presencia de zonas muertas, esto último gracias a las líneas de flujo obtenidas por la técnica ya mencionada.

Toda la información obtenida en este artículo significó importantes hallazgos para la producción de acero inoxidable en el sistema real del tundish industrial del cual estaban partiendo, ya que el número de planchones mixtos producidos durante la colada con un cambio de composición química está estrechamente relacionado con la mezcla de la masa fundida del tundish. El autor menciona que los resultados de este tipo de investigación podrían servir como criterio de validación en simulaciones CFD de futuros trabajos [13]. Pero hay algo muy importante a considerar, y es que dentro del artículo mencionan que el equipo fue calibrado, y cito, de 'forma simple', más no de forma analítica, por lo que no consideraron parámetros ópticos ni físicos, esto puede conllevar a errores y resultados que no son 100% confiables.

De la revisión de la literatura con tres revisiones del estado del arte cronológicamente reportadas, se deduce que las principales herramientas de análisis de proceso del tundish son los modelos físicos y matemáticos validados con modelos físicos. Sin embargo, el estado del arte indica que el análisis del mezclado requiere una mayor profundidad que solo lo pueden dar las técnicas novedosas PIV y PLIF que relacionan la fluido dinámica con la transferencia de masa de una manera muy detallada a diferencia de las curvas C o F que solo dan una idea del comportamiento general del mezclado en el tundish. Por eso, en esta tesis como primera instancia se construyó un arreglo experimental flexible y portátil de un modelo físico de un tundish para que sirva como un sistema en donde se pueda implementar las técnicas PLIF y PIV en un futuro próximo. Como muestra de la eficacia del arreglo experimental se realizó un estudio convencional de mezclado del distribuidor con uno y dos hilos obteniendo curvas C mediante la técnica tradicional de turbidimetría.



**Figura 9.** Sistema del modelo físico usado por Koitzsch y colaboradores para la experimentación de su artículo. Contiene un brazo flexible, laser, cámaras, sistema de cómputo, sistema de PIV y el modelo de acrílico [13]

## 1.8. Hipótesis

Al construir un sistema de acrílico escalado de un distribuidor de colada continua de 1 y 2 hilos, sin modificadores de flujo, el sistema construido y ensamblado dará la suficiente portabilidad y flexibilidad en su operación tal que se pueda implementar la técnica de turbidimetría para obtener curvas C y caracterizar el mezclado químico dentro del reactor, mostrando que, a una mayor turbulencia, se tendrá un mayor tiempo de residencia y por consecuencia, mejor porcentaje de mezclado.

En este caso particular, aunque ambos sistemas cuenten con flujos turbulentos de la misma magnitud, el tundish de 1 hilo presentará un mayor tiempo de residencia que el de 2 hilos, ya que hay una única salida, lo que dará como resultado una mayor probabilidad de eliminar las partículas sólidas por flotación en el tundish y que éste alimente a los moldes un acero con mayor limpieza.

## 1.9. Objetivos

### *General*

- Construir un sistema para operar un modelo físico de un distribuidor de colada continua, para el estudio y medición del mezclado químico a través de curvas C obtenidas mediante la técnica de turbidimetría.

### *Particulares*

- A partir de materiales presentes en el laboratorio o de fácil adquisición, diseñar y construir un modelo físico de un distribuidor de colada continua del acero industrial, el cual satisfaga criterios de similitud geométrica, dinámica y cinemática.
- Calibrar un equipo de turbidimetría que nos permita implementar la técnica experimental en modelos de 1 y 2 hilos.
- Con los resultados experimentales de turbidimetría, reportar sus respectivas curvas C y calcular el porcentaje de volumen mezclado, pistón, muerto y combinado dentro de los dos sistemas.
- Analizar los resultados de ambos modelos y determinar el sistema con mejor nivel de mezclado, y así emitir conclusiones y recomendaciones



## Capítulo 2. Metodología

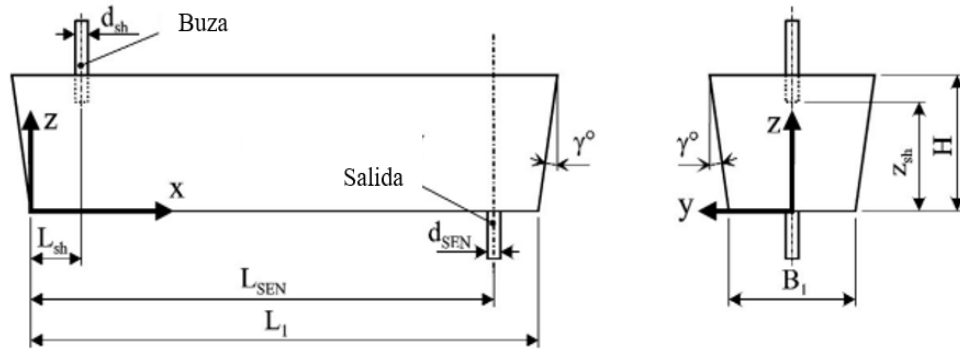
### 2.1. Koitzsch como referencia para el trabajo presente

En este trabajo, se espera continuar con el estudio del mezclado químico dentro de distribuidores de colada continua, mediante la técnica de turbidimetría. Al tratarse de uno de los artículos más recientes y novedosos acerca del tema de estudio, se decidió partir del trabajo de Koitzsch y colaboradores [13], abordado en la revisión de la literatura, como antecedente principal.

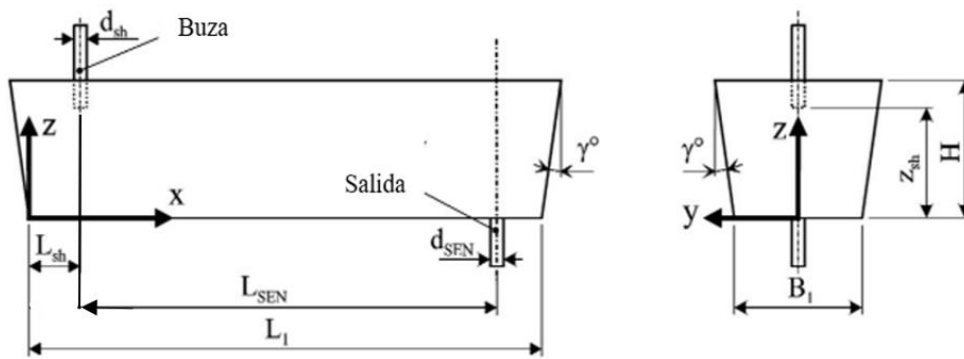
La mayoría de las industrias siderúrgicas alrededor del mundo, cuentan con distribuidores de colada continua de 2 hilos, por lo que, para esta tesis se estudiará un modelo físico del reactor en cuestión, con la misma escala que el presentado en el artículo de Koitzsch y colaboradores a través de dos experimentos. Un experimento se llevará a cabo con un modelo de 1 un hilo de salida, tal como el reportado en el artículo de Koitzsch, mientras que el otro experimento se llevará a cabo con un modelo de 2 hilos de salida, los más comunes a nivel industrial.

A pesar de esta ser una tesis basada en un artículo ya publicado, existen ciertas diferencias a considerar entre ambos trabajos, especialmente en el experimento con el modelo de dos hilos, ya que la buza, por donde entra el agua, tendrá una disposición diferente dentro del sistema, además, al tratarse de dos salidas y al ser un sistema de estado estacionario, el número de Reynolds y otras variables de interés, serán diferentes a los reportados en la literatura y a los del experimento de un hilo.

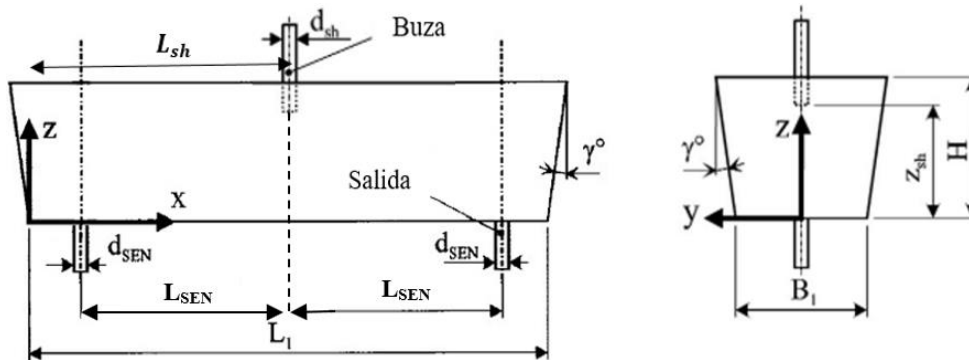
En la **Figura 10** se muestra esquemáticamente las variaciones y similitudes dimensionales que existen entre el modelo del artículo, y el modelo de uno y dos hilos usados para esta tesis. En la **Tabla 1** se muestran las dimensiones en centímetros correspondientes a la **Figura 10** y al sistema real, mientras que en la **Tabla 2** se pueden observar los criterios de similitud y otras variables de interés usados en los tres modelos (trabajo presente con un y dos hilos, y modelo de Koitzsch) contrastado contra el sistema real.



(a)



(b)



(c)

**Figura 10.** Vista frontal y lateral de a) modelo usado en el artículo de Koitzsch y colaboradores, tundish de una entrada y un hilo de salida, b) modelo usado en la tesis presente, tundish de una entrada y un hilo de salida, c) modelo usado en la tesis presente, tundish de una entrada y dos hilos de salida

**Tabla 1.** Dimensiones del sistema real y los modelos físicos en centímetros (cm)

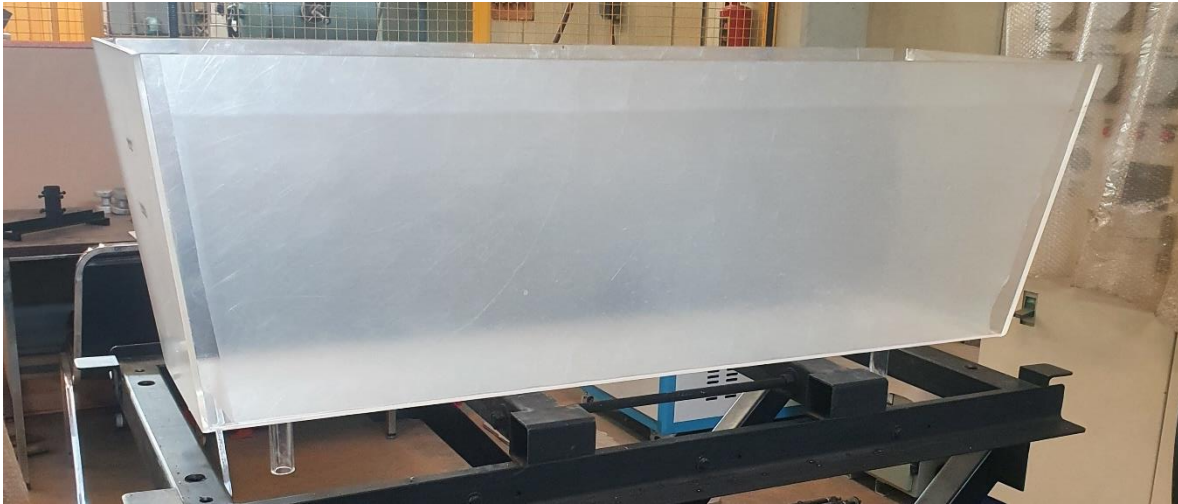
<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Sistema real</b>	<b>Modelo de Koitzsch</b>	<b>Modelo experimental de 1 hilos</b>	<b>Modelo experimental de 2 hilos</b>
<b>Longitud del distribuidor</b>	$L_1$	314	104.7	105	105
<b>Ancho del distribuidor</b>	$B_1$	78	26	26	26
<b>Altura del distribuidor</b>	$H$	80	26.6	37	37
<b>Altura del líquido (operación)</b>	----	80	26.6	27	27
<b>Ángulo de inclinación de las paredes</b>	$\gamma^\circ$	7	7	7	7
<b>Distancia de la salida</b>	$L_{SEN}$	288.5	96.2	88	44
<b>Distancia del borde inferior a la salida inmediata</b>	----	25.5	8.5	8.5	8.5 por salida
<b>Diámetro de la salida</b>	$d_{SEN}$	7	2.3	1.82	1.82
<b>Longitud de la salida</b>	----	----	10	10	10
<b>Distancia buza-fondo del distribuidor</b>	$Z_{sh}$	60	20	20	20
<b>Posición de la buza al borde inferior inmediato</b>	$L_{sh}$	25.5	8.5	8.5	52.5

**Tabla 2.** Criterios de similitud y variables de interés usados en los modelos vs el sistema real

<b>Nombre</b>	<b>Unidades</b>	<b>Sistema real**</b>	<b>Modelo de Koitzsch**</b>	<b>Modelo experimental de 1 hilos</b>	<b>Modelo experimental de 2 hilos</b>
<b>Similitud geométrica (Escala)</b>	-----	-----	1:3	1:3	1:3
<b>Numero de Reynolds</b>	-----	10380	5000	5832.45	6684.88
<b>Numero de Froude</b>	-----	$2.23 \times 10^{-3}$	$2.23 \times 10^{-3}$	$2.23 \times 10^{-3}$	$2.23 \times 10^{-3}$
<b>Viscosidad cinemática</b>	$\frac{m^2}{s}$	$8.72 \times 10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$
<b>Viscosidad dinámica</b>	$\frac{Kg}{m \cdot s}$	-----	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
<b>Densidad (acero/agua)</b>	$\frac{Kg}{m^3}$	$\approx 8000$	997	997	997
<b>Flujo volumétrico</b>	$\frac{l}{s}$	5.39	0.35	0.48	0.55

\*\* Dichos valores fueron obtenidos directamente del artículo de Koitzsch y colaboradores [13]

El modelo físico de acrílico transparente que se tiene en el laboratorio para simular el proceso de la refinación del acero a través del mezclado durante la colada continua se puede observar en la **Figura 11**.

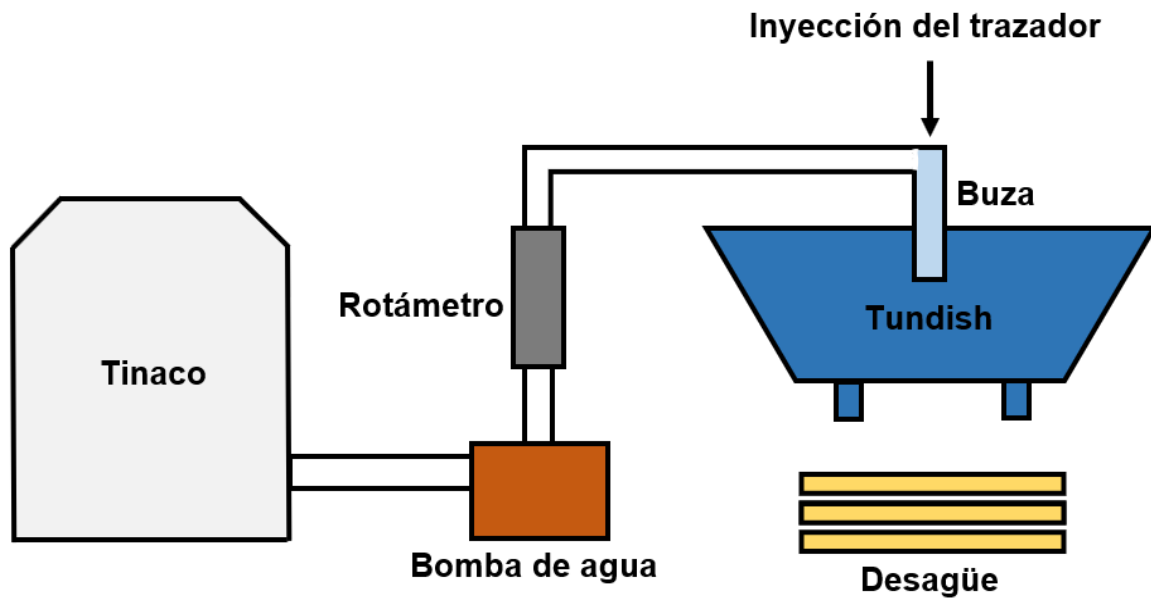


**Figura 11.** Modelo físico de acrílico de un tundish con escala 1:3

Para simular de forma precisa el proceso de mezclado químico y sus variables de operación dentro un tundish industrial, el modelo de acrílico por sí solo no sirve. Se requiere del diseño y la construcción de un sistema de plomería, así como la calibración de un sistema de medición, que permita llevar a cabo la experimentación lo más apagada a la realidad industrial que sea posible, y de esa manera, cuantificar dicho mezclado dentro del reactor escalado.

La construcción del sistema toma en cuenta los experimentos a realizar, pero también pretende ser funcional para futuros trabajos con diversas líneas de investigación. Es por ello que el sistema a fabricar está ideado para ser desarmable, ser transportable de un lugar a otro y que pueda ser modificado o configurado según las necesidades experimentales.

Para este trabajo de tesis, el cual implementa la técnica de turbidimetría, el fluido de salida puede ir directamente al desagüe, ya que el trazador es pintura acrílica diluida. El esquema de la configuración para este trabajo se puede observar en la **Figura 12.**



**Figura 12.** Esquema general de la configuración usada en esta tesis para la simulación del modelo físico de un distribuidor de colada continua

De forma general, el sistema debe ser alimentado con agua durante todo el proceso experimental, es por ello que se requiere un tinaco de alimentación con el líquido en cuestión. Este tinaco debe estar conectado a una bomba para extraer el agua y conducirla por todo el sistema, ya que se trata de un sistema en estado estacionario, donde el nivel del agua dentro del distribuidor debe permanecer siempre a cierta altura, aun cuando exista salida del líquido, se necesita regular el flujo de agua en el sistema, es por ello que la bomba se conecta a un rotámetro, el cual permitirá regular el flujo de entrada en el sistema y de esta manera, mantener el estado estable requerido. El rotámetro se conectará a una manguera que posteriormente se conectará con una buza, instrumento de alimentación para el tundish; en esta unión de manguera/buza, se debe inyectar el trazador durante el proceso experimental. Como ya se mencionó anteriormente, al ser un trazador de pintura acrílica diluida en agua, el fluido de salida puede ser directamente arrojado al desagüe.

Una vez establecida la configuración de los elementos principales que constituyen al sistema para llevar a cabo la modelación física del mezclado químico, se debe construir a detalle cada segmento de este.

## 2.2. Construcción del sistema para el modelo físico

Para la construcción del modelo se utilizaron los materiales y equipos listados en la **Tabla 3.**

**Tabla 3.** Materiales y equipos usados en la construcción del modelo

1 mesa de perfil de acero en desuso (Chatarra de acero)
6.5 m de perfil cuadrado de acero
70 cm de perfil L de acero
20 cm de perfil circular de acero de 2"
15 cm de perfil circular de acero de 1 ½"
70 cm de placa de acero
2 tablas de ½" de 60x30 cm
Mesa elevadora de acero con carrito deslizante
2 espárragos de ½" y 1 metro de largo c/u
4 ruedas
3 latas de pintura mate en aerosol color negro
5 m de manguera de alta presión de
5 abrazaderas de manguera de 1 ¼ - 2"
45 cm de tubo PVC de 1" reforzado
25 cm de tubo PVC de 1 ½"
1 codo de PVC de reducción de 1 ½ - 1"
24 tornillos de ¼"
8 tuercas de ¼"
8 rondanas de ¼"
20 tornillos de ½"
44 tuercas de ½"
44 rondanas de ½"
1 planta portátil de soldadura por arco eléctrico
Electrodos para soldadura
1 tinaco de 750 L
1 bomba de agua
1 rotámetro Blue-White F-420 de 30-150 LPM
Taladro
Cortadora
Disco de pulido metálico
Pegamento para PVC
2 prensas pequeñas

Todos los materiales y equipos mencionados en la Tabla 3, se maquinaron y fueron acondicionados en los laboratorios 203 y de fundición, en el edificio D de la Facultad de Química. La construcción del sistema para modelar físicamente el proceso de colada continua se divide en las siguientes etapas:

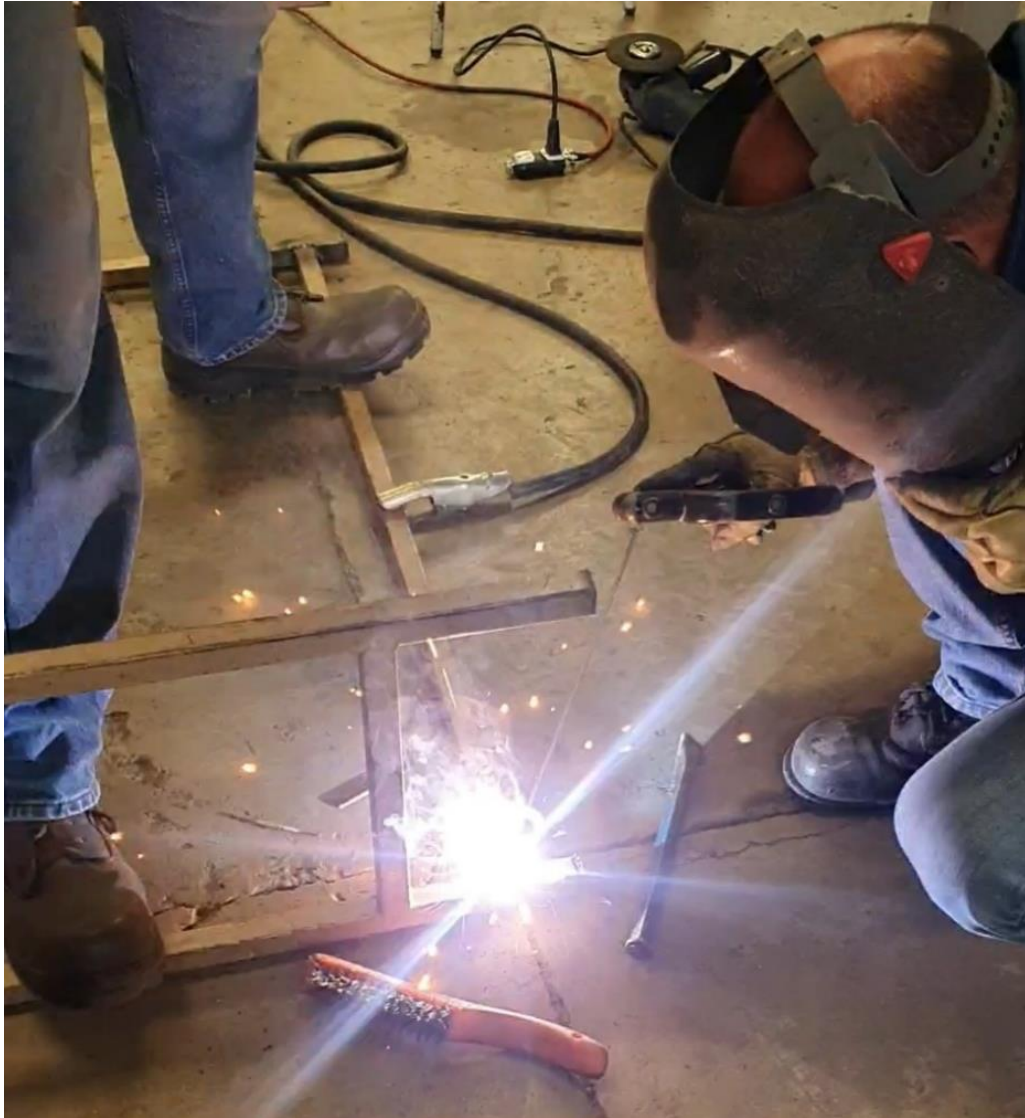
- Base de la bomba y rotámetro
- Mesa elevadora
- Buza
- Sostén de la buza

### **2.2.1. Base de la bomba y rotámetro**

Como se mostró anteriormente en la representación esquemática de la configuración del sistema, se requiere de un rotámetro derecho y alineado para la medición correcta del flujo que ingresa al sistema. Este rotámetro a su vez va conectado en la parte inferior a una bomba y en la superior a una manguera, de tal forma que el agua pueda ingresar al tundish de acrílico, por su parte superior. Se construyó una base para colocar la bomba de agua y el rotámetro y que así, su acomodo fuera el correcto.

Para el esqueleto de la base, se utilizó una mesa hecha de perfil de acero, la cual se encontraba en desuso y como chatarra en el laboratorio de fundición. Como la mesa debe cargar el peso de la bomba, el rotámetro y la manguera, se requiere que la estructura cuente con un gran soporte, además de estabilidad, ya que la bomba al momento de usarse generará una fuerte vibración. Es por ello que se les soldó a las patas de la mesa, 1 perfil cuadrado de acero de 1.2 metros en sus 2 extremos laterales inferiores de mayor longitud, a través de una soldadura por arco eléctrico. Este primer paso se puede observar en la **Figura 13**.





**Figura 13.** Soldadura por arco eléctrico de 2 perfiles de acero a la estructura principal para darle mayor soporte y estabilidad

Posteriormente, la mesa fue colocada de forma vertical, y una vez acomodada de esa forma, en su parte inferior se le colocó una tabla de  $\frac{1}{2}$ " y de 60x30, la cual fue sujeta a la mesa con ayuda de 6 tornillos, tuercas y rondanas de  $\frac{1}{2}$ ". A esta tabla se le atornillaron 4 ruedas, una en cada extremo de la base ya formada, con 8 tornillos de  $\frac{1}{4}$ ". Después, se midió la altura completa de la base, desde las ruedas hasta el extremo superior, y se calculó a qué altura a la que tenía que quedar la bomba en la base, para que la bomba pudiera conectarse directamente a la salida del tinaco.

Se cotaron 2 perfiles de acero de 60 cm y otros 2 de 30 cm, estos perfiles fueron soldados a la altura calculada, en estructura principal, formando un rectángulo en el cual se atornilló otra tabla de  $\frac{1}{2}$ " de 60x30 cm. En esta nueva tabla quedó asentada y atornillada la bomba de agua. Una vez fija la bomba, el rotámetro se conectó a esta con ayuda de un trozo de manguera de alta presión y 2 abrazaderas.

En los extremos superiores de la estructura, de lado donde quedó la conexión de la bomba, se soldaron los 2 perfiles cuadrados de acero de 20 cm cada uno, de forma que sobresalían de la estructura. Posterior a eso, se crearon 2 estructuras por separado, las cuales fueron hechas con perfil cuadrado y circular de acero. Se cortaron 4 piezas de perfil cuadrado de 10 cm de largo cada uno, 8 piezas de placa de acero de 5 cm de largo cada una y 2 piezas de perfil circular de 2" con un largo de 5 cm cada una. A una pieza de perfil cuadrado se le soldó en un extremo y de forma paralela, 2 piezas de las placas de acero, mientras que al otro extremo se le soldó el perfil circular. Del otro lado del perfil circular, se le soldó a la misma altura, para un arreglo simétrico, otra pieza del perfil cuadrado y sus respectivas placas al extremo de este. Con ayuda de un taladro, al perfil circular se le hicieron 2 orificios de  $\frac{1}{4}$ " para que lo que se ingrese dentro de este, con ayuda de 2 tornillos de las mismas pulgadas, pueda fijarse.

Se repitió el mismo procedimiento para generar una estructura gemela a la ya descrita. Estas 2 estructuras se colocaron horizontalmente en los perfiles cuadrados que sobresalían de la base, y de esta forma, se formaron dos travesaños que sirven como soporte para mantener recto el rotámetro y su conexión con la manguera que alimenta el modelo, tal y como se muestra en la **Figura 14**.

Por último, se pintó toda la base constituida por acero y madera, con aerosol negro mate y así retardar problemas derivados a la corrosión. La estructura completa y terminada, con las conexiones entre la bomba, rotámetro y manguera, se puede observar en la **Figura 15**.



**Figura 14.** Travesaños para rotámetro y manguera



**Figura 15.** Base para la bomba y el rotámetro

### **2.2.2. Mesa elevadora**

Se trata de una mesa con llantas, un carrito de deslizamiento en su base la cual se encuentra totalmente abierta y un sistema de polea manual que la hace subir o bajar su altura según se requiera. En esta mesa se posa el modelo de acrílico del tundish, ya que, al tener una base abierta, permite la descarga del agua al desagüe directo. La mesa es una estructura con la que ya se contaba en el laboratorio, pero se le realizaron algunas modificaciones para su uso en este sistema.

El dispositivo de alimentación del sistema, la buza, debe ir por encima y centrado en el modelo de acrílico, por lo que se requirió de una estructura que permitiera sostener y alinear el sistema de alimentación.

Con ayuda de un taladro, se perforaron 2 extremos superiores de un mismo lado de la mesa, en donde se introdujeron 2 espárragos de  $\frac{1}{2}$ " y 1 metro de largo, los cuales quedaron sobresalientes en la parte superior de la mesa, fijados a la mesa por 2 tuercas y rondanas cada uno. Se cortó un perfil cuadrado de acero de 1.1 metros de largo y en cada extremo del perfil, se perforó con una broca de  $\frac{1}{2}$ ", este perfil se fijó en sus perforaciones a los espárragos sobresalientes con ayuda de 2 tuercas y 2 rondanas en cada extremo, lo que permitió formar un travesaño.

Se tomó otro perfil cuadrado de acero el cual tuviera su sección cuadrada más grande que el travesaño ya formado, y se cortó en 2 piezas de 20 cm de largo cada uno y se soldaron en forma de 'T', de tal manera que la base de esta 'T', entrara y se desliza a lo largo de todo el travesaño. A esta pequeña estructura se le soldaron por encima 2 perfiles circulares de acero de 2" y de 5 cm de largo, y así, la pieza diseñada sirviera como brazo para sostener la manguera y la buza. En la parte superior de los perfiles circulares de la estructura en 'T', se perforaron con una broca de  $\frac{1}{4}$ " para introducirles tornillos de esa misma pulgada, de esta forma, la manguera y la buza quedan fijas a la estructura; mientras que en el perfil cuadrado de la misma estructura en 'T', se perfora de la misma manera para que este brazo pueda fijarse al travesaño por medio de 2 tornillos traseros.

Toda esta estructura implementada a la mesa elevadora sirve para sostener y alinear la manguera y la buza, y que esta, pueda alimentar correctamente al modelo. El travesaño puede moverse hacia arriba o hacia abajo, y el brazo o la 'T' puede moverse de derecha a izquierda, de esta manera se puede ajustar el sistema de alimentación según la necesidad. En la **Figura 16** puede observarse la estructura completa de la mesa elevadora con las modificaciones realizadas, mientras que en la **Figura 17** se aprecia más de cerca el travesaño y su brazo en forma de 'T'.



**Figura 16.** Mesa elevadora con estructura para sostener la conexión manguera-buza



**Figura 17.** Travesaño y estructura en 'T' para sostener la conexión manguera-buza

### 2.2.3. Buza

La buza es el conducto por donde se alimenta al sistema. Esta, según sus dimensiones, mantendrá el estado estable a cierto flujo, y debe satisfacer el balance de masa sin acumulación en donde lo que entra debe ser igual a lo que sale y asegurar así un estado estable más fácilmente manejable. Debido a que se trabajó con dos sistemas experimentales, 1 hilo y 2 hilos de salida, el diámetro de la buza se calculó para ambos casos. Las ecuaciones 12 y 13 son derivadas de un balance de masa.

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = 0 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 12)}$$

$$\text{Entrada} = \text{Salida} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 13)}$$

Tomando en cuenta que el flujo volumétrico que entra tiene que ser el mismo que salga por los hilos del tundish tenemos que para 1 hilo:

$$v_{Ent} * A_{Ent} * \rho_{H2O} = v_{Sal} * A_{Sal} * \rho_{H2O} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 14)}$$

Mientras que para 2 hilos se tiene que:

$$v_{Ent} * A_{Ent} * \rho_{H2O} = v_{Sal1} * A_{Sal1} * \rho_{H2O} + v_{Sal2} * A_{Sal2} * \rho_{H2O} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 15)}$$

Donde  $v_{Ent}$  es la velocidad de flujo a la entrada,  $A_{Ent}$  es el área de la entrada,  $v_{Sal}$  es la velocidad de flujo a la salida,  $A_{Sal}$  es el área a la salida y  $\rho_{H2O}$  la densidad del agua.

Para 1 hilo, en la Ecuación 14, resulta fácil deducir que la buza requiere un diámetro igual a su única salida, es decir de 1.82 cm, mientras que, para 2 hilos, si simplificamos la Ecuación 15 obtenemos:

$$A_{Ent} = A_{Sal1} + A_{Sal2} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 16)}$$

$$\pi r_{Ent}^2 = \pi r_{Sal1}^2 + \pi r_{Sal2}^2 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 17)}$$

$$r_{Ent} = \sqrt{r_{Sal1}^2 + r_{Sal2}^2} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 18)}$$

El cálculo para 2 hilos da como resultado un diámetro en la buza de 2.57 cm. Comparando ambos diámetros y los materiales disponibles para construir esta herramienta, se decidió solo construir la buza de 2.57 cm, ya que fabricar una buza de 1.82 cm de diámetro iba a ser complicado, en cambio, una buza con un diámetro de 2.57 cm, se podría fabricar fácilmente con tubo PVC de 1" (2.54 cm) reforzado. Para el experimento de 1 hilo, se estableció bajar el flujo hasta encontrar el punto donde el sistema se mantuviera en estado estable.

Se tenía una conexión manguera-tubo PVC de 1 ½", por lo que se fabricó una buza de 45 cm de tubo PVC de 1" reforzado, unido con pegamento para PVC a un codo reductor de 1 ½ - 1", el cual a su vez se unió al PVC de 1 ½" que iba conectado a la manguera a través de abrazaderas. La buza que se construyó para alimentar el sistema, se puede observar en la **Figura 18**.



**Figura 18.** Buza construida con tubo PVC para el presente trabajo

#### **2.2.4. Sostén de la buza**

Durante una de las pruebas preliminares para comprobar si el sistema funcionaba para simular el proceso de colada continua y era capaz de mantenerse en estado estable, se observó que, debido a las vibraciones ocasionadas por la bomba y el flujo turbulento del agua, la buza se movía hacia adelante, hacia atrás y hacia los lados, lo que implicaba errores experimentales graves que influyen directamente con la dinámica de fluidos dentro del reactor, y por ende, con nuestro estudio del mezclado químico.

Fue por esto que se pensó y construyó una estructura que se colocara encima del tundish y se pidiera mover de lugar si era necesario. Dicha estructura tendría como función ser un 'sostén' que fijara la buza al centro del tundish (En el plano y) y que esta no se moviera en ninguna dirección.



Para la construcción de este sostén, se usaron 2 perfiles L de acero de 35 cm de largo cada uno, 4 láminas de acero de 8 cm de largo y un perfil circular de acero de 1 ½" y 15 cm de largo.

Con el ancho interno justo del tundish, los perfiles L se soldaron al perfil circular, el cual fue colocado justo a la mitad, para que, al momento de ponerlo encima del modelo de acrílico, este dispositivo estuviera justo en medio del tundish en su plano 'y', y por consecuencia, la buza que se introduce dentro del sostén, quedara justo en medio del sistema. Se soldaron 2 placas de acero en cada extremo del sostén, paralelas entre sí, con el grosor justo del acrílico, formando unas tipo pinzas para que el sostén pudiera fijarse al modelo.

Luego, con ayuda del taladro, se perforó el perfil circular 8 veces en forma de cruz para que pudieran entrar tornillos de ¼ de pulgada, y de esta manera fijar la buza cuando se encuentre dentro de este dispositivo. Esta estructura puede quitarse y ponerse, ya que entra de forma justa y exacta, esto nos permite mover y alinear el sostén a través de todo el largo del modelo según más convenga. Este sostén puede observarse en la **Figura 19**, mientras que en la **Figura 20** se muestra colocado en el modelo.



**Figura 19.** Sostén para la buza



**Figura 20.** Sostén para la buza colocado encima del modelo

### **2.3. Etapa experimental**

Una vez que todas las etapas para simular el proceso de colada continua fueron construidas y que el sistema completo funcionó correctamente, se continuó con las pruebas experimentales, las cuales, para llevarse a cabo, requirieron de diversos materiales y equipos que se encuentran listados en la **Tabla 4**.

**Tabla 4.** Materiales y equipos usados en la experimentación para medir el mezclado químico dentro del modelo

1 turbidímetro portátil HANNA HI-98703
4 soluciones estandarizadas de 0.1, 15, 100 y 750 NTU
25 frascos con tapa estandarizados de 10 mL para equipos de turbidimetría
Pintura vinil acrílica VINIMEX-Comex color blanco
1 pipeta volumétrica de 1 mL
1 pipeta volumétrica de 5 mL
1 pipeta volumétrica de 10 mL
3 matraces aforados de 250 mL
3 matraces aforados de 1 L
1 vaso de precipitado de 100 mL
1 agitador de vidrio
1 cronometro
1 jeringa de 5 mL
1 aguja de 18 G
Agua
Equipo de computo

Cuando ya se contaba con todos los materiales y equipos que permitían medir el mezclado químico dentro del modelo de 1 y 2 hilos, comenzó la experimentación, la cual, se divide en las siguientes etapas:

- Calibración del equipo para turbidimetría
- Experimento de turbidimetría
- Obtención de curvas C
- Porcentajes de volumen muerto, volumen pistón y volumen mezclado

### **2.3.1. Calibración del equipo para turbidimetría**

Para cualquier técnica de medición, se requiere una previa calibración. En este caso para turbidimetría, el equipo usado fue un turbidímetro portátil calibrado con soluciones estandarizadas de 0.1, 15, 100 y 750 NTU. Para calibrar el equipo, se realizaron los siguientes pasos:

1. Se encendió el equipo con el botón de 'ON/OFF'
2. Una vez prendido, se pulsó el botón 'CAL', y con un paño especial que contiene el equipo, se limpió el frasco de solución estandarizada de 0.1 NTU.
3. Se abrió la tapa del equipo, se introdujo el frasco con la solución estandarizada y se alineó la marca del frasco con la marca del equipo. Posteriormente se cerró la tapa del equipo y se pulsó el botón 'READ'.
4. El equipo comenzó a leer la muestra, y una vez que terminó, en la pantalla del equipo apareció una leyenda donde indicaba que debías retirar el frasco e introducir de la misma manera la solución estandarizada siguiente, en este caso, marcó introducir la solución de 15 NTU.
5. Los pasos del punto 3 y 4, se repitieron hasta llegar a la lectura de la última solución estandarizada de 750 NTU, y una vez que se llegó a ese punto, el equipo finalizó la calibración llevándonos de nuevo a la pantalla de inicio. El equipo estaba listo para ser usado.

Para obtener las curvas C de estos experimentos, necesitábamos conocer la concentración del trazador y como al inyectarse dentro del sistema, su dilución paulatina podía relacionarse directamente con la turbidez. Para esto se requería de una curva de calibración de Turbidez NTU vs Concentración % m/m (concentración masa-masa o porcentaje en peso).

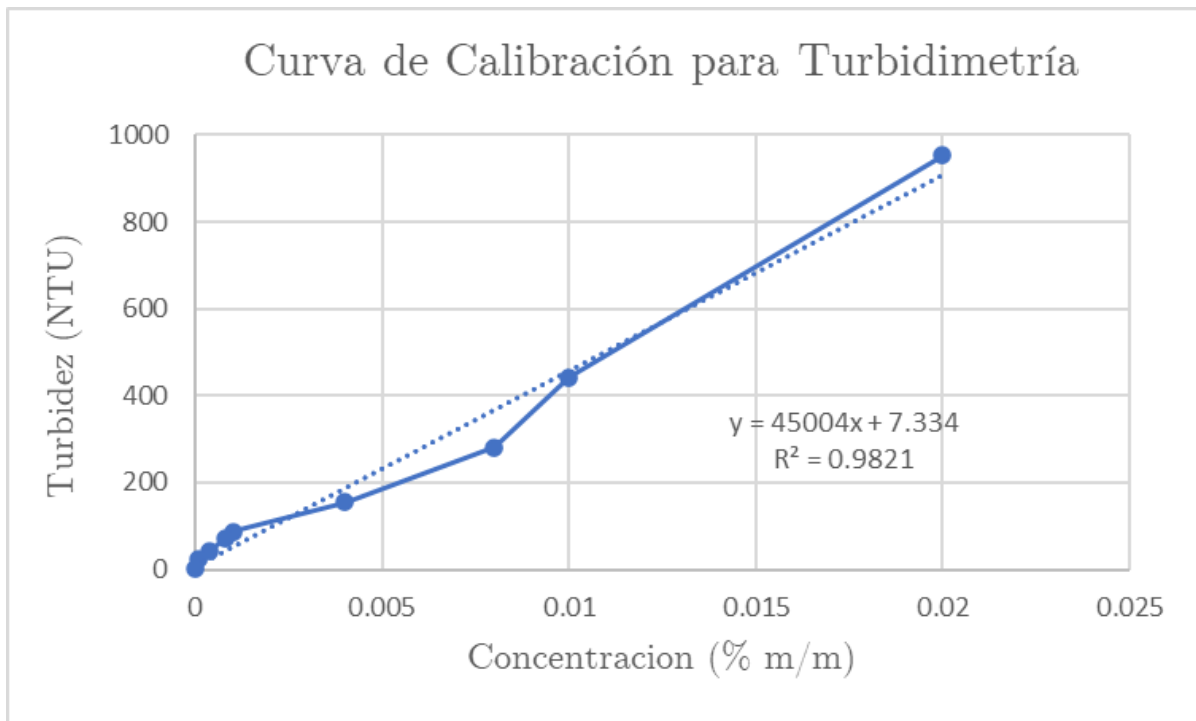
El equipo de turbidimetría solo lee y registra muestras por encima de su última solución estandarizada, hasta 1000 NTU. El trazador usado para los experimentos se trató de una pintura acrílica blanca con una concentración de 45% m/m y bastante opacidad, en otras palabras, el fluido no deja pasar luz en una proporción aceptable, por ende, su turbidez era extremadamente alta para que pudiese ser leída por el equipo.

Para poder generar la curva de calibración que relacionara la concentración y la turbidez, con ayuda de material químico de laboratorio, de forma empírica se diluyó la pintura en varias disoluciones (con concentraciones conocidas) hasta que visualmente una de ellas se pareciera a la solución estandarizada de 750 NTU.

Al final se obtuvo una dilución con una concentración de 0.02% m/m y una lectura de 953 NTU. Esa solución, se volvió a diluir 8 veces más hasta llegar a una concentración de 0.00001% m/m y una lectura de 2.83 NTU. Con estos datos fue posible generar la curva de calibración y una ecuación de la recta, la cual relaciona los NTU con una cierta concentración del trazador usado. Los resultados de esta calibración pueden verse en la **Figura 21** (diluciones) y **Figura 22** (curva de calibración).



**Figura 21.** Patrones preparados para realizar la curva de calibración utilizada en la técnica de turbidimetría



**Figura 22.** Curva de calibración de diluciones para experimento de turbidimetría con pintura blanca acrílica al 45% m/m como trazador

### 2.3.2. Preparación del trazador

Como ya se mencionó en el apartado de la introducción, para realizar los experimentos, se necesita inyectar una pequeña cantidad de trazador concentrado. La pintura blanca al 45% m/m con la que se contaba, debía ser inyectada con una jeringa de 5 mL y una aguja de 18G, pero la pintura sin diluir es muy espesa y era imposible inyectarla en el sistema con la jeringa.

Fue por ello que antes de comenzar las pruebas de turbidimetría, se diluyó la pintura acrílica blanca hasta un punto que pudiese conservar una elevada concentración, pero al mismo tiempo fuese menos espesa para poder pasar por la jeringa y aguja en un solo pulso sin ninguna dificultad. Al final se preparó 50 mL de una dilución de pintura al 34.6% m/m, hecha con 38 mL de pintura y 12 mL de agua.

### 2.3.3. Experimento de turbidimetría

No existe registro del tiempo que tardó el experimento en el artículo de Koitzsch y sus colaboradores, pero al realizar un cálculo con el dato del tiempo de residencia registrado en dicho artículo, se dedujo que su tiempo de experimentación fue de aproximadamente 10 minutos con 36 segundos. Para construir curvas C, se requiere medir la concentración del fluido de salida en diferentes deltas de tiempo, y gracias a la investigación teórica acerca de las curvas RTD, sabemos que la mayor variación de la concentración que puede existir en un reactor se da al inicio del experimento en los primeros segundos, es por ello que se decidió que la toma de muestras a la salida del modelo, después del primer segundo, se llevaría a cabo cada 5 segundos hasta llegar al primer minuto experimental, después de ese punto, las muestras se recolectarían cada 40 segundos.

Para realizar el experimento de turbidimetría, se requirió armar el sistema en el laboratorio de fundición, y una vez que estaba todo conectado, con tapones de plástico se sellaron las respectivas salidas del modelo y se procedió a suministrar el flujo de agua hasta llenar el tundish a la altura de operación requerida (27 cm). Una vez que se llegó al nivel de líquido deseado, se retiraron los tapones de las salidas y con la llave de agua, se estuvo modificando el flujo hasta que el sistema permaneciera en estado estable al nivel de operación ya mencionado.

Cuando se logró el estado estacionario, en la unión manguera-buza, de lado de la manguera se introdujo de forma vertical una aguja y una jeringa con 5 mL de trazador diluido, el cual se inyectó en un solo pulso a la corriente del sistema. El cronometro empezó a correr al mismo tiempo que se inyectó el trazador, y desde el primer segundo, con los frascos estandarizados para turbidimetría, en la salida del modelo comenzó la recolección de las muestras en los deltas de tiempo estipulados.

Los frascos con las muestras recolectadas fueron acomodados en orden, y una vez que el experimento concluyó, se llevaron inmediatamente a su lectura en el turbidímetro. Los experimentos de turbidimetría para 1 y 2 hilos fueron replicados dos veces cada uno. En la **Figura 23** se puede ver como se tomaron las muestras en cada experimento.



**Figura 23.** Toma de muestras durante el experimento de turbidimetría

#### **2.3.4. Obtención de curvas C**

La obtención de curvas RTD permite realizar un análisis del mezclado químico en el modelo, y una vez obtenidas las mediciones de turbidimetría a cierto delta de tiempo, se debe graficar la concentración adimensional contra el tiempo adimensional. Para obtener las curvas C es necesario realizar los siguientes cálculos [3]:



$$\bar{t} = \frac{V}{Q} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 19)}$$

$\bar{t}$  es el tiempo medio de residencia, V el volumen del sistema ocupado por el líquido en  $m^3$  y Q el flujo volumétrico en  $\frac{m^3}{seg}$ .

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 20)}$$

$\theta$  es la forma del tiempo adimensional para el estudio de los sistemas donde ocurre el mezclado. Este tiempo adimensional esta dado por el tiempo de recolección, t, al cual se toma una muestra, sobre el tiempo medio de residencia  $\bar{t}$ .

$$m_T = mL_{inyec} * \rho_T \dots\dots\dots \text{(Ecuación 21)}$$

$m_T$  es la masa del trazador inyectado, producto de los mL de trazador inyectado,  $mL_{inyec}$ , por su densidad,  $\rho_T$ , en  $\frac{g}{mL}$

$$\bar{C} = \frac{m_T}{V} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 22)}$$

La concentración media  $\bar{C}$  esta dada por la masa del trazador inyectado en g, entre el volumen del líquido dentro del sistema en  $m^3$ .

$$C_\theta = \frac{C}{\bar{C}} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 23)}$$

$C_\theta$  es la forma de la concentración adimensional para el estudio de los sistemas donde ocurre el mezclado. Este se encuentra en función de la concentración de una muestra recolectada en la salida a un tiempo determinado, C, sobre la concentración media,  $\bar{C}$ . Con los datos obtenidos hasta este punto, es posible generar las curvas  $C_\theta$  vs  $\theta$  de cada prueba experimental realizada.

### 2.3.5. Porcentajes de volumen muerto, volumen pistón y volumen mezclado

Una vez obtenidas las curvas C y los valores adimensionales de tiempo y concentración, se puede calcular la fracción de volumen mezclado que el modelo posee, además de las fracciones del volumen muerto y del volumen pistón. Estos volúmenes se obtienen a través de la normalización de la curva, a partir de cálculos propuestos por Sahai y Emi [19] enfocados en distribuidores de colada continua. El cálculo de la fracción de estos tres volúmenes se realiza de la siguiente manera.

$$\sum_{\theta=0}^{\infty} C_{\theta} \Delta\theta = 1 \quad \dots\dots\dots \text{(Ecuación 23)}$$

El área bajo la curva que se obtiene al graficar la concentración adimensional  $C_{\theta}$ , a través del incremento del tiempo adimensional  $\Delta\theta$ , debe ser igual a una unidad, tal como se muestra en la Ecuación 23.

$$\frac{Q_a}{Q} = \sum_{\theta=0}^2 C_{\theta} \Delta\theta = \frac{\sum_{\theta=0}^2 (C_{\theta} \theta)}{\sum_{\theta=0}^2 (C_{\theta})} \quad \dots\dots\dots \text{(Ecuación 24)}$$

$\frac{Q_a}{Q}$  es el flujo activo, y se define como el área bajo la curva del primer tiempo adimensional  $\theta$  registrado hasta  $\theta = 2$ , o, en otras palabras, se trata de la suma de la fracción de volumen pistón y la fracción de volumen mezclado.

Pasando el tiempo adimensional  $\theta = 2$ , comienza la fracción de volumen muerto representada como  $\frac{V_d}{V}$ . La fracción de volumen muerto  $\frac{V_d}{V}$ , se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} \quad \dots\dots\dots \text{(Ecuación 25)}$$

Ya que se ha calculado la fracción de volumen muerto se procede a realizar el cálculo de fracción de volumen pistón representado como  $\frac{V_p}{V}$ .

$$\frac{V_p}{V} = \frac{\theta_{min} + \theta_{max}}{2\bar{t}} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 26)}$$

La fracción de volumen pistón  $\frac{V_p}{V}$ , es igual al tiempo adimensional donde se detecta la primera aparición de trazador en la salida del modelo ( $\theta_{min}$ ) más el tiempo adimensional donde se detecta la mayor concentración de trazador a la salida ( $\theta_{max}$ ), todo eso dividido entre 2 veces el tiempo medio de residencia  $\bar{t}$ .

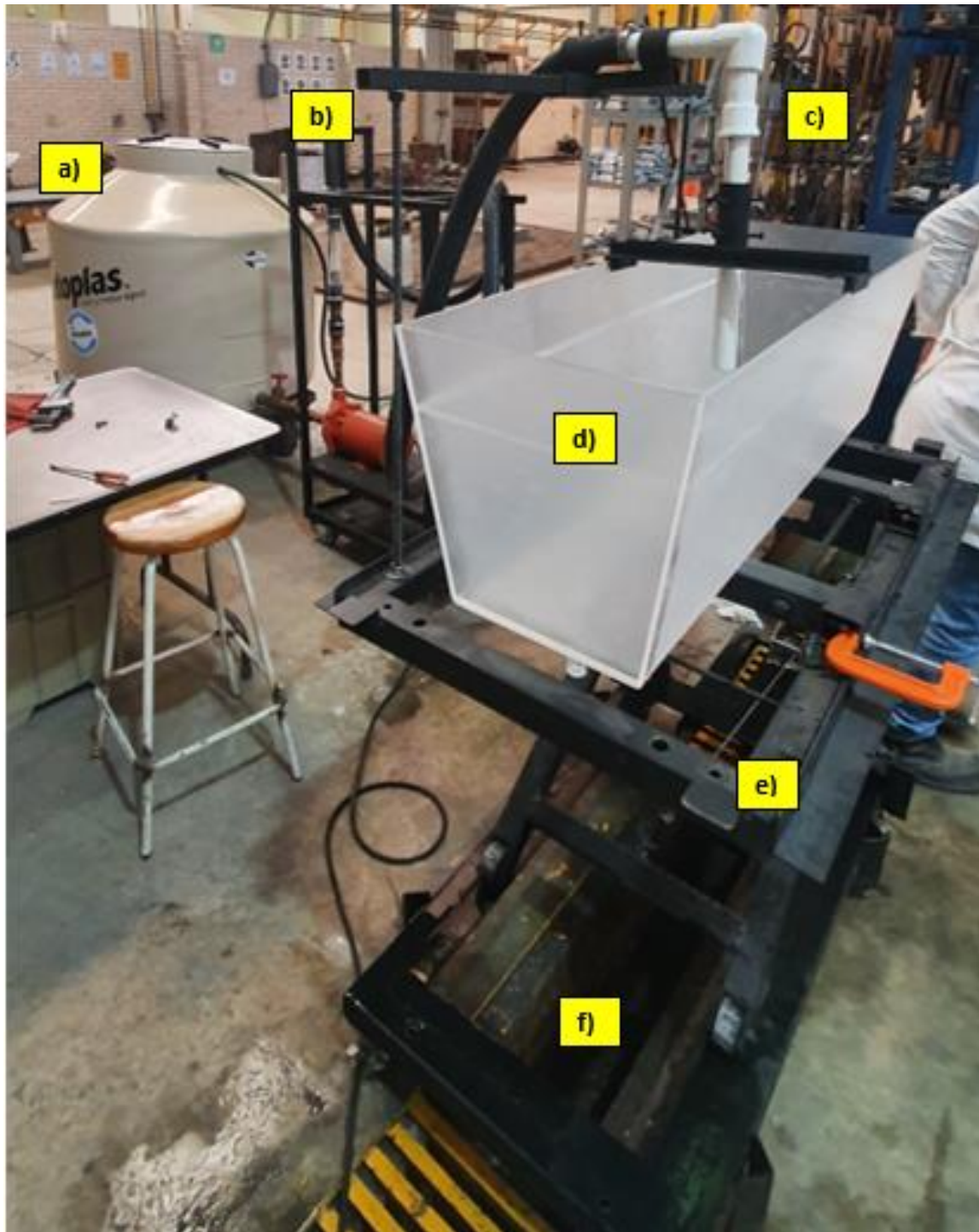
Teniendo en cuenta que la suma de las 3 fracciones debe dar 1, el volumen mezclado, representado como  $\frac{V_m}{V}$ , es igual a 1 menos la suma de las fracciones de volumen muerto y volumen pistón.

$$\frac{V_m}{V} = 1 - \left( \frac{V_d}{V} + \frac{V_p}{V} \right) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 27)}$$

### Capítulo 3. Resultados y Discusión

El objetivo principal de esta tesis fue la construcción de un sistema que nos permitiera operar un modelo de un distribuidor de colada continua. Este modelo como ya se ha venido mencionando a lo largo de este trabajo, está basado en un artículo científico de Koitzsch y colaboradores, el cual a su vez está basado en un sistema real de 16 toneladas de capacidad.

Lo construido en esta tesis se trata de un sistema experimental robusto, transportable y desarmable, compuesto con materiales de fácil acceso y bajo costo, el cual puede ser fácilmente modificable, ya que la configuración mostrada en este trabajo está pensada en líneas de investigación que estudien el mezclado químico a través de varias técnicas, pero también, se desea que el sistema pueda generar diversos estudios relacionados al proceso de colada continua. En la **Figura 24** se puede observar el sistema construido y conectado listo para operar, mientras que en la **Figura 25** se pueden ver más de cerca sus componentes.



**Figura 24.** Sistema completo armado y conectado para modelación física en un distribuidor de colada continua por la técnica de turbidimetría a) Tinaco de alimentación b) Base de bomba y rotámetro, c) Travesaño para la entrada de la buza, buza y sostén de la buza, d) Modelo escalado de un distribuidor de colada continua, e) Mesa elevadora f) Salida al desagüe



(a)



(b)



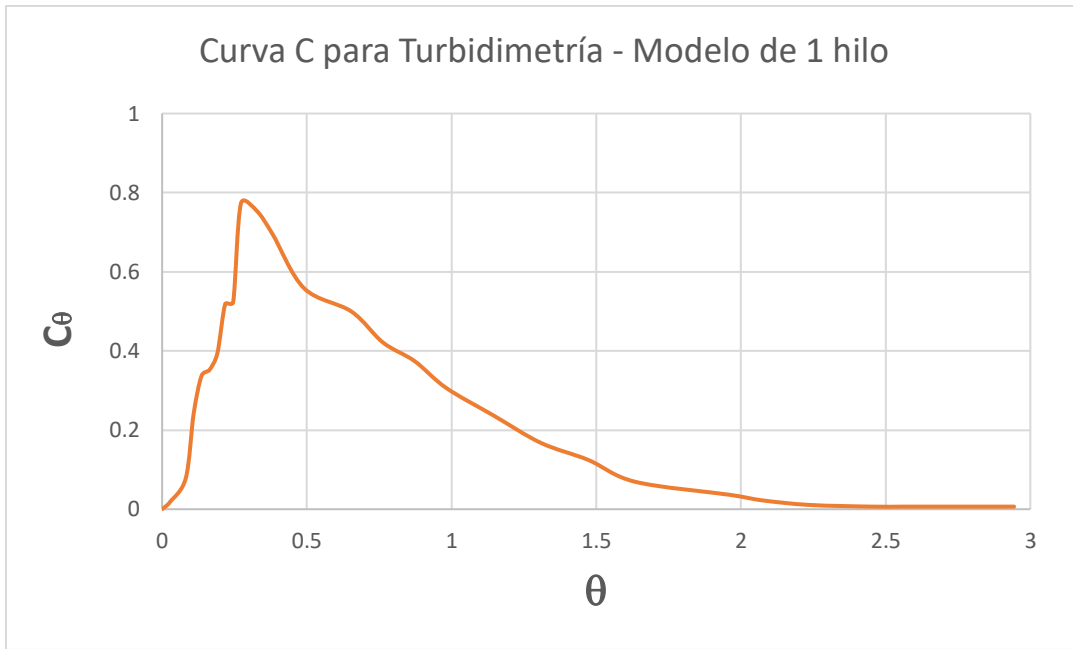
(c)

**Figura 25.** Segmentos que comprenden el sistema para el modelado físico en un distribuidor de colada continua por la técnica de turbidimetría a) Tinaco de alimentación b) Base de bomba y rotámetro c) Travesaño para la entrada de la buza, buza, sostén de buza, modelo de acrílico de un tundish escalado y meza elevadora

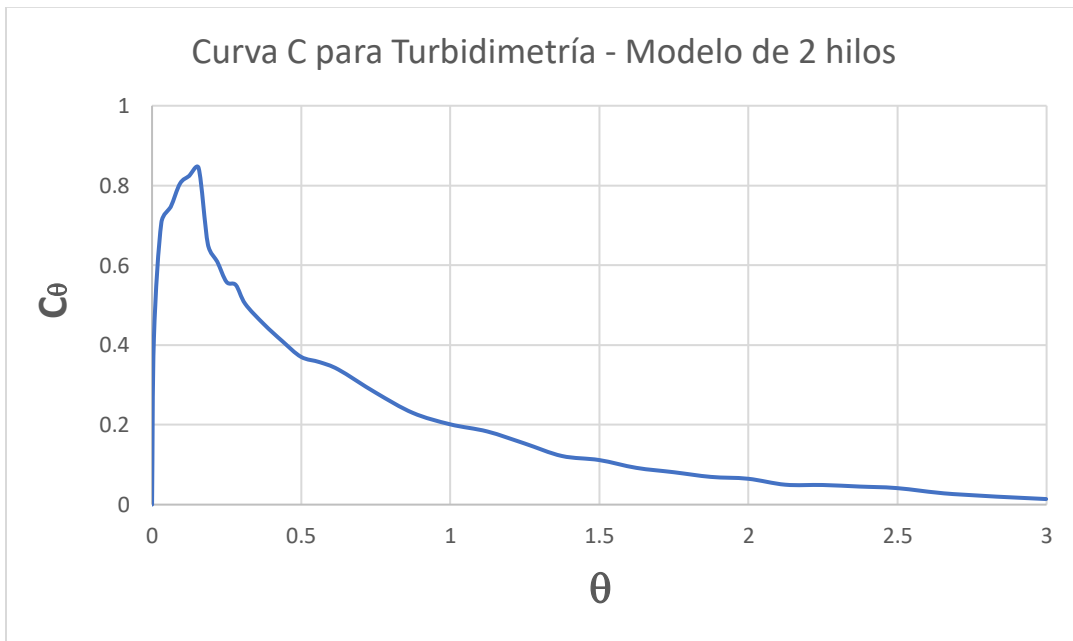
Cuando el sistema se echó a andar y se logró mantener el estado estable a la altura requerida, el flujo de operación para el distribuidor de un hilo fue de 0.48 l/s, y el flujo para el distribuidor de 2 hilos fue de 0.55 l/s, ambos mayores al flujo reportado en el artículo de Koitzsch el cual fue de 0.35 l/s. Los Reynolds también variaron, para el experimento de 1 hilo se calculó un Reynolds de 5832, para el experimento de 2 hilos se calculó un Reynolds de 6684, mientras que el reportado en el artículo es de 5000. Las variables más importantes y los resultados de las pruebas experimentales se pueden ver listados en la **Tabla 5**, en la **Figura 26** se pueden observar las curvas C de 1 y 2 hilos obtenidas por separado, mientras que en la **Figura 27** se pueden apreciar ambas curvas juntas para su comparación.

**Tabla 5.** Resultados de las pruebas experimentales para un modelo de 1 y 2 hilos

<i>Nombre</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Unidades</i>	<i>Resultados del modelo de 1 hilo</i>	<i>Resultados del modelo de 2 hilos</i>
<b>Flujo de agua suministrado</b>	Q	$\frac{l}{s}$	0.48	0.55
<b>Reynolds</b>	Re	-----	5832.45	6684.88
<b>Concentración media</b>	$\bar{C}$	$\frac{g}{m^3}$	65.87	65.87
<b>Tiempo medio de residencia</b>	$\bar{t}$	seg	183.430	160.085
<b>Volumen Muerto</b>	$\frac{V_d}{V}$	%	5.11	12.98
<b>Volumen Pistón</b>	$\frac{V_p}{V}$	%	23.72	19.02
<b>Volumen Mezclado</b>	$\frac{V_m}{V}$	%	71.17	67.99
<b>Volumen Combinado</b>	$\frac{V_m}{V} + \frac{V_d}{V}$	%	76.28	80.97

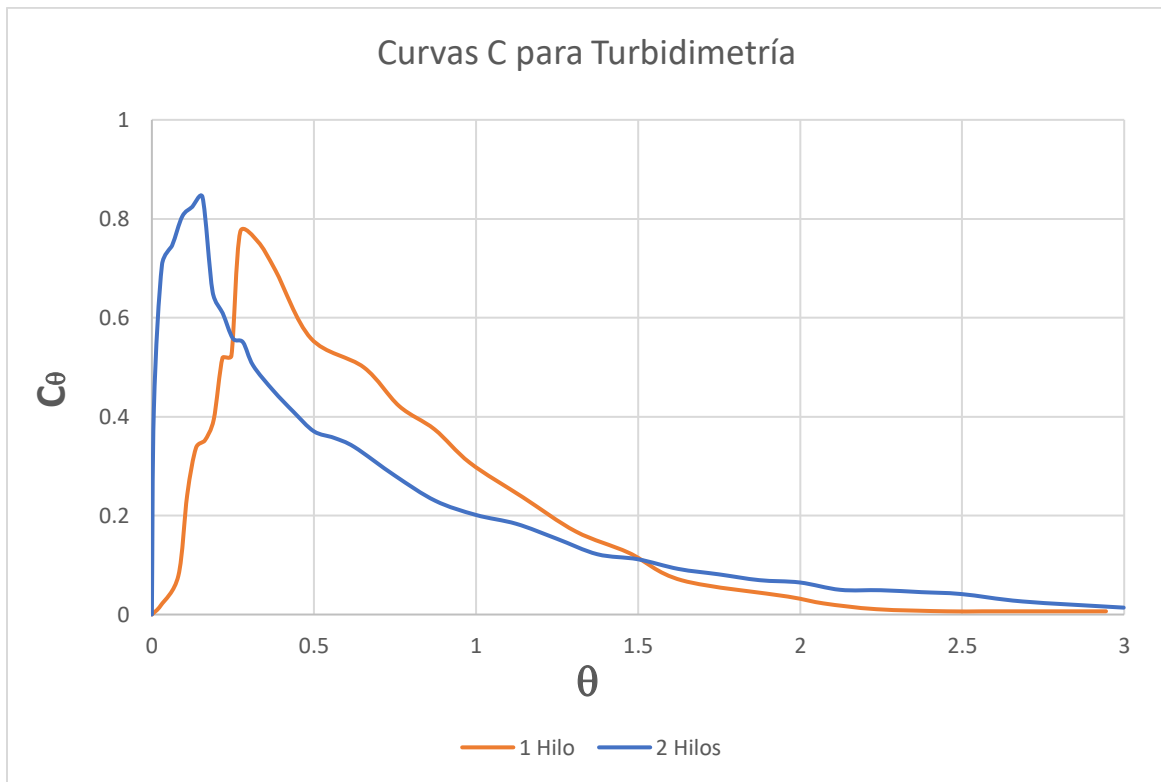


a)



b)

**Figura 26.** Curva RTD o C que muestra la concentración adimensional ( $C_\theta$ ) contra el tiempo adimensional ( $t_\theta$ ) del experimento realizado a) en un modelo de 1 hilo b) en un modelo de 2 hilos



**Figura 27.** Comparación entre ambas curvas C obtenidas en los experimentos con modelos de distribuidores de colada continua de 1 y 2 hilos

La **Figura 27** muestra las curvas obtenidas de forma experimental para 1 y 2 hilos, ambas cuentan con una tendencia "típica", o, en otras palabras, ambas presentan un comportamiento mixto de flujo pistón y flujo mezclado, donde rápidamente aparece la presencia del trazador a la salida del dispositivo para luego descender paulatinamente a medida que pasa el tiempo. A pesar de que ambas curvas presenten comportamientos mixtos, vale la pena recalcar que la curva perteneciente al modelo de 2 hilos, presenta una mayor tendencia a un mezclado perfecto, ya que el pico de concentración se encuentra muy desplazada a la izquierda. Esta curva proporciona información importante acerca de cómo el soluto viaja a través del modelo.



En los picos más altos de cada curva, es donde convergen el flujo pistón y el flujo mezclado. En el modelo de 1 hilo, el pico de la curva se encuentra en  $\theta = 0.27$ , a la izquierda de este punto es la zona pistón que representa al soluto que no se mezcla desde que entra hasta que sale, esta zona posee un volumen pistón de 23.72%, a la derecha de este punto y hasta llegar a  $\theta = 2$ , se trata de la zona de volumen mezclado, esta zona posee un volumen de mezcla de 71.17%. Para el modelo de 2 hilos, el flujo pistón y mezclado convergen en  $\theta = 0.16$ , a la izquierda de este punto se cuenta con un volumen pistón de 19.02%, mientras que a la derecha hasta  $\theta = 2$  se obtuvo un volumen mezclado de 67.99%.

El flujo pistón representa un régimen laminar del sistema. En el caso de flujo pistón las posibles partículas de inclusiones se arrastran y siguen una trayectoria idéntica al del fluido, por lo que si no se dirige al flujo hacia la superficie libre, las inclusiones acabarán en el molde. El flujo mezclado por otro lado está gobernado por la difusión turbulenta del sistema y es característico de alta turbulencia. Las partículas que se arrastran en este tipo de flujo siguen un movimiento caótico, errático o estocástico con preferencia en la dirección principal del flujo, pero con componentes en las 3 direcciones y esto puede facilitar su colisión, eventual formación de clusters (aglomeración de inclusiones) y eliminación por flotación o por atrapamiento con la escoria.

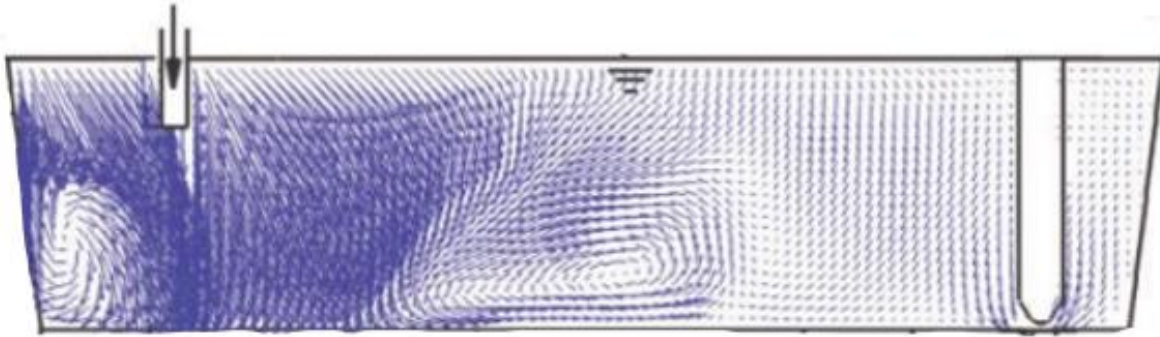
El volumen mezclado es el porcentaje de mayor interés, ya que este nos indica la fracción de volumen, y por consecuencia, la capacidad que el reactor posee para eliminar las partículas sólidas, que, traducido a un proceso industrial siderúrgico real, sería el porcentaje de limpieza que el distribuidor de colada continua le daría al acero, al eliminar inclusiones no deseados por clusters formados que aumentan su flotabilidad o por movimientos caóticos cercanos a la superficie libre que las atrapan en la escoria. En este caso y por una ligera diferencia, el modelo de tundish con mayor porcentaje de mezclado resulto ser el de 1 hilo.

$\theta = 1$  representa el tiempo medio de residencia, para el modelo de 1 hilo se obtuvo un tiempo de residencia de 183.43 segundos, mientras que para el modelo de 2 hilos su tiempo de residencia es de 160.085 segundos, nuevamente, el modelo de 1 hilo posee un valor superior que el de 2 hilos. Estos resultados comprueban la hipótesis establecida al inicio del trabajo, donde se planteó que, a mayor tiempo de residencia, mejor nivel de mezclado. Esto sucede justamente porque las partículas de soluto, o ya traducido en un proceso industrial, las partículas de escoria, al pasar más tiempo dentro del reactor son más susceptibles a ser flotadas y/o eliminadas del acero, lo que produce una mayor limpieza del baño metálico.

Otro parámetro que se considera importante es el tiempo adimensional en el que empieza a detectarse el soluto. En ambos casos la detección es casi instantánea, aunque con un hilo es menos concentrada la primera muestra que con dos hilos, lo que indica sin duda que con dos hilos hay muchos cortocircuitos, es decir, hay paquetes de fluido que al entrar encuentran la salida de manera casi instantánea, mientras que, con un hilo, al tener la entrada alejada de la salida el cortocircuito es menor. Los cortocircuitos son indeseables en los distribuidores ya que limitan el desempeño del tundish como último dispositivo para promover la limpieza del acero.

Por otro lado, el área bajo la curva de  $\theta = 2$  en adelante se le denomina zona de volumen muerto, la cual representa la fracción de soluto que tarda más de dos veces el tiempo de residencia promedio en salir. El volumen muerto suele ser entendido como zonas estancadas y sin movimiento, pero también pueden interpretarse como patrones de flujo donde existe mucha recirculación antes de salir del sistema, y aunque su interacción es muy baja (como para pensar que es flujo estancado), si existe. Para el modelo de un hilo el porcentaje de volumen muerto fue de 5.11%, mientras que el de 2 hilos fue de 12.98%, lo cual indica que en el modelo de 2 hilos existen más zonas de recirculación, o en su defecto, las zonas de recirculación en el modelo de 2 hilos son más grandes (de mayor área) que en el modelo de 1 hilo. Como referencia para esta idea tenemos el mapeo de las líneas de flujo en el

artículo de Koitzsch para un distribuidor de 1 hilo [13], el cual muestra 2 zonas de recirculación en el corte transversal del modelo, una más pequeña que la otra, mientras que en el artículo de Mazumdar que abarca desde 1999 hasta 2010 [9], muestra las líneas de flujo en un distribuidor de 2 hilos el cual presenta 4 zonas de recirculación en su corte transversal, estas referencias se pueden observar en la **Figura 28**.

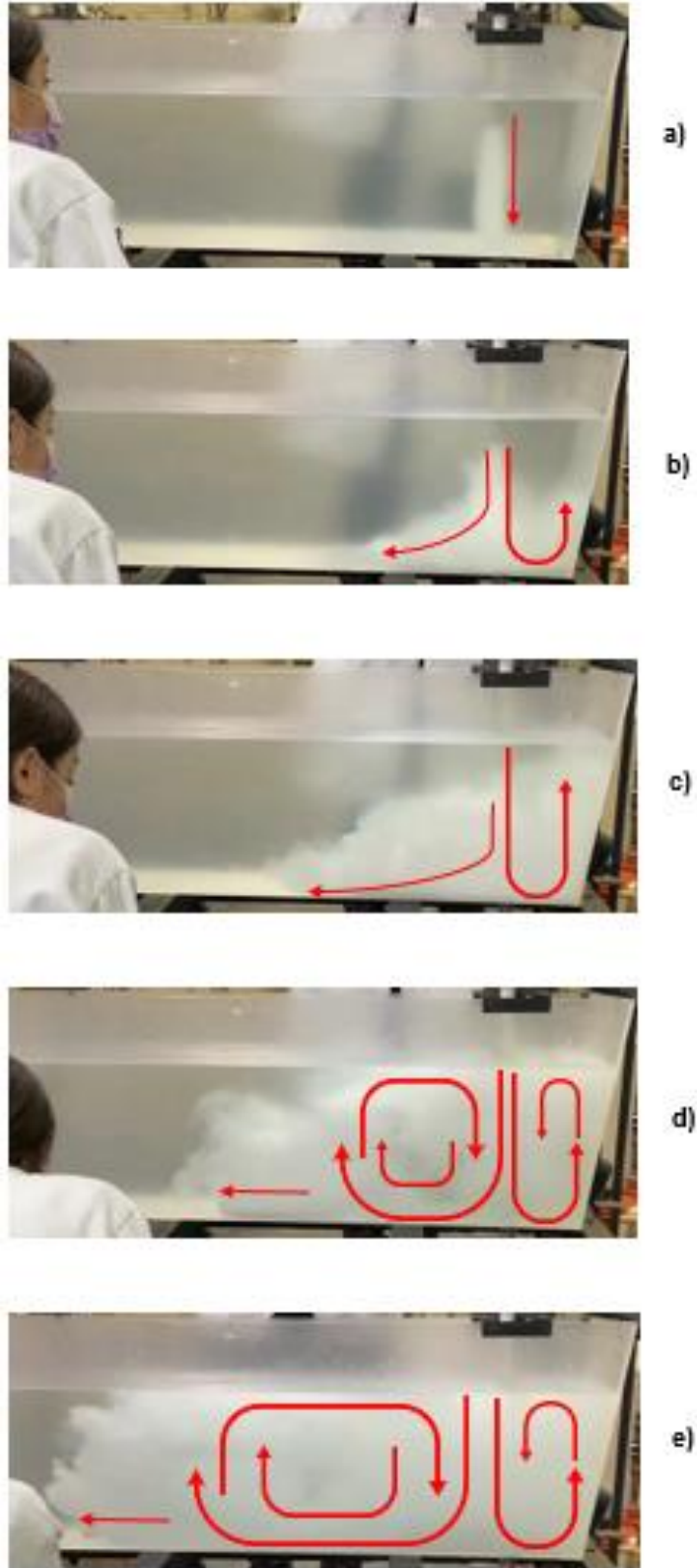


a)

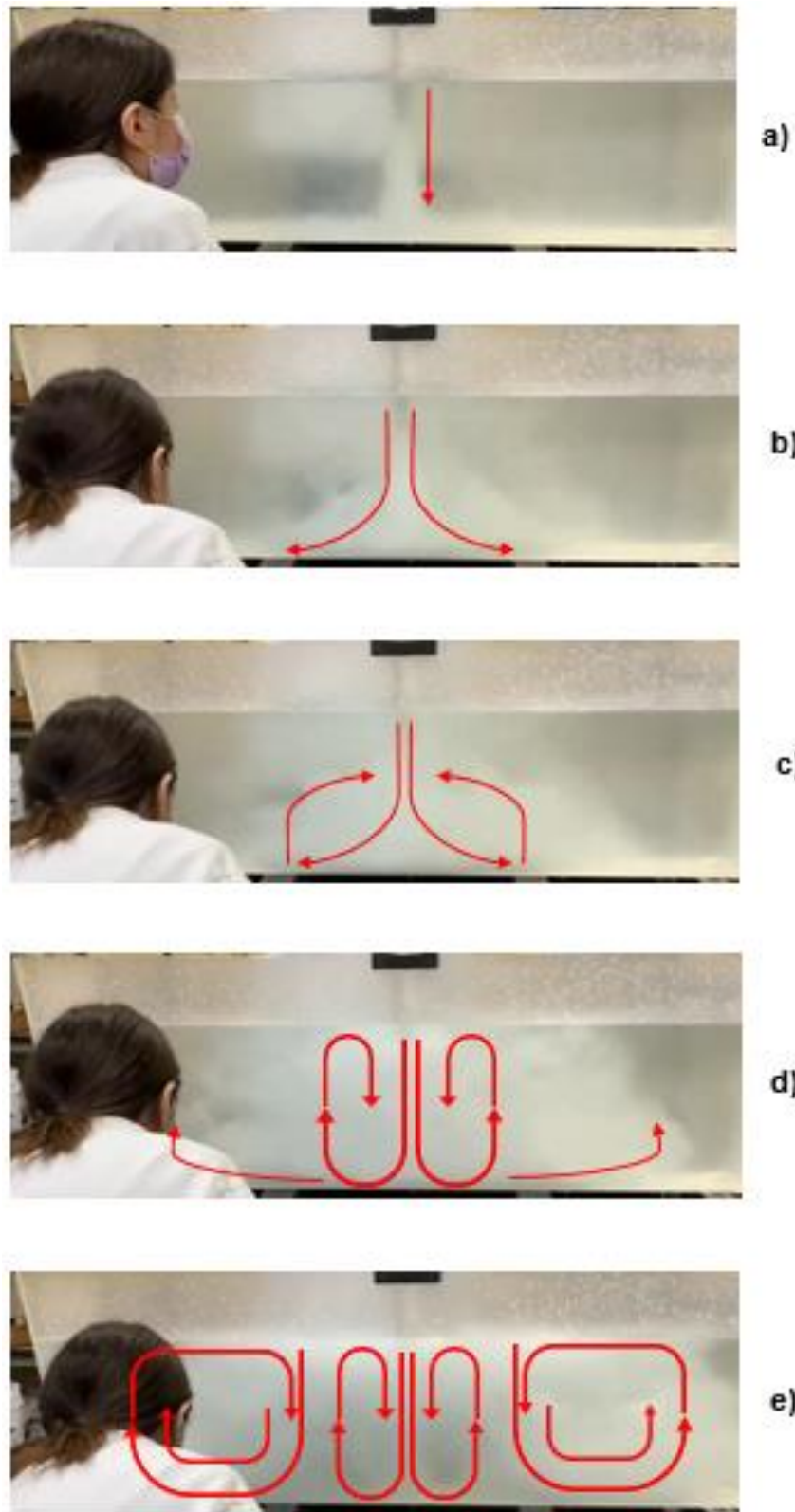


b)

**Figura 28.** Líneas de flujo que muestran las zonas de recirculación a) modelo de un distribuidor de 1 hilo en el artículo de Koitzsch que muestra al menos 2 recirculaciones b) modelo de distribuidor de 2 hilos en el artículo de Mazumdar que muestra al menos 4 recirculaciones [9] [13]



**Figura 29.** Deducción de las posibles líneas de flujo en el experimento de turbidimetría para el modelo de 1 hilo a los a) 1.47 seg b) 2.35 seg c) 3.5 seg d) 6.45 seg e) 12.06 seg



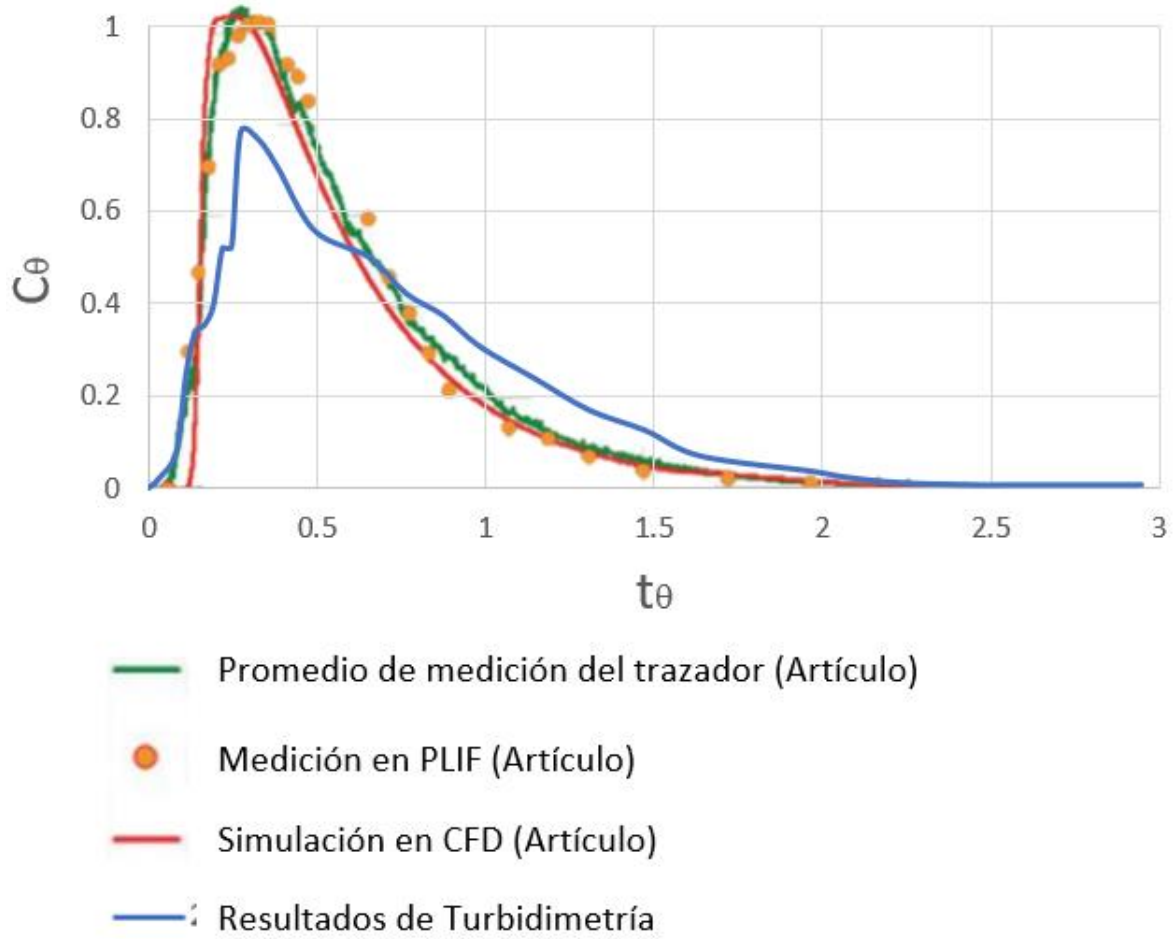
**Figura 30.** Deducción de las posibles líneas de flujo en el experimento de turbidimetría para el modelo de 2 hilos a los a) 0.1 seg b) 0.29 seg c) 0.99 seg d) 1.52 seg e) 2.5 seg

La **Figura 29** y la **Figura 30** muestran un conjunto de imágenes de los experimentos en el modelo de 1 y 2 hilos, esta figura pretende ser tomada como una pequeña referencia de las posibles recirculaciones que se estiman existen dentro del modelo; para el modelo de 1 hilo se estimaron 2 recirculaciones, una más pequeña que la otra, mientras que para el modelo de 2 hilos se estimaron 4 recirculaciones, 2 pequeñas y 2 grandes. Si se desea algo preciso, se recomienda usar para futuros trabajos un aperlante en frío, el cual al añadirlo a un flujo de corriente, la alta viscosidad de este producto permite la formación de líneas que avanzan según la trayectoria del fluido, lo que permitiría mapear las recirculaciones dentro del reactor; otra recomendación aún más puntual, es el uso de técnicas más sofisticadas como PIV, la cual permitirían mapear las líneas de flujo que existen a la hora de operar el modelo, estableciendo una idea más sólida acerca de las recirculaciones.

Las recirculaciones están directamente relacionadas con la turbulencia del sistema, y esta a su vez, con el nivel de mezclado; es por ello que algunos autores como Mazumdar en sus revisiones a través de las décadas y Koitzsch, dejan entrever algo que denominaremos volumen combinado, el cual es la suma del volumen mezclado y el volumen muerto. El volumen combinado toma en cuenta las zonas de recirculación ya que son vistas como homogeneizadoras del fluido, y aunque estas contengan volúmenes muertos que tardan mucho en salir del reactor y pueden afectar directamente en el tiempo de operación del proceso, el volumen combinado eleva el potencial mezclador. En este caso si sumamos los volúmenes mezclados y muertos de nuestros modelos, tenemos que para 1 hilo su volumen combinado es de 76.28% y para el de 2 hilos es de 80.96%; el modelo de 2 hilos resulta tener mayor potencial mezclador por sus zonas de elevada recirculación, a pesar de ello, no existe una diferencia en el nivel de mezclado tan considerable entre ambos modelos.

Un dispositivo óptimo es aquel que genere curvas con máximos muy pequeños y dispersiones muy amplias en un periodo de tiempo que resulte óptimo para el proceso de producción. En este trabajo de tesis ambos modelos poseen máximos elevados (volumen pistón), por lo que otras variables que alteren la turbulencia y recirculación del fluido dentro del modelo, como modificadores de flujo en ciertas secciones, podrían reducir los máximos y expandir la zona de mezclado. Los modificadores de flujo también aumentan los tiempos de residencia, un parámetro muy importante en el desempeño de un distribuidor; se recomienda su uso para el trabajos y estudios futuros.

Por último, se tiene la **Figura 31** donde se compara la curva C obtenida en el artículo de Koitzsch y la experimental obtenida en esta tesis del modelo de 1 hilo. El artículo de Koitzsch y colaboradores reporta 0.35 l/s de flujo y un tiempo de residencia de 210 segundos, pero no establecen porcentajes de los volúmenes que obtuvieron, mientras que en el experimento para el modelo de 1 hilo realizado para este trabajo se usó un flujo de 0.48 l/s y se obtuvo un tiempo de residencia de 183.43 segundos. Estas diferencias a pesar de tratarse del mismo modelo pueden deberse a que ellos usaron una técnica experimental combinada de PIV-PLIF, que desde nuestro punto de vista no se calibró correctamente, además, en esta tesis se realizó turbidimetría, una técnica tradicional, por lo que es natural la discrepancia. A pesar de que es evidente una diferencia entre ambas curvas, se puede observar que el tiempo adimensional  $\theta$  donde comienza el mezclado, es casi idéntico, por lo que se podría decir que el sistema construido opera de forma correcta y puede ser usado en estudios futuros para distribuidores de colada continua.



**Figura 31.** Comparación entre los resultados del artículo de Koitzsch [13] con su modelo y los resultados experimentales obtenidos en turbidimetría para el modelo de 1 hilo



## Capítulo 4. Conclusiones

- Se construyó un sistema para modelar físicamente el proceso de colada continua en un modelo de acrílico el cual cumple con los criterios de similitud cinemática, dinámica y geométrica en una escala 1:3 y el modelo es portátil, desarmable y flexible para trabajos de investigación futuros.
- Las curvas C obtenidas de la experimentación por la técnica de turbidimetría, presentan una tendencia de flujo mixto. Para el modelo de 1 hilo la curva posee un 23.72% de volumen pistón, un 5.11% de volumen muerto y un 71.17% de volumen mezclado, estableciendo un tiempo medio de residencia de 183.43 segundos. Para el modelo de 2 hilos la curva posee un 19.02% de volumen pistón, un 12.98% de volumen muerto y un 67.99% de volumen mezclado, estableciendo un tiempo medio de residencia de 160.085 segundos. Con estos resultados se comprueba la hipótesis propuesta al inicio del trabajo, donde se establece que, a mayor tiempo medio de residencia, mejor porcentaje de volumen mezclado. A pesar de esto, no existe mucha variación o diferencia entre los resultados obtenidos en el modelo de 1 y de 2 hilos.
- El porcentaje de volumen combinado en el modelo de 1 hilo resultó ser de 76.28% y en el modelo de 2 hilos fue de 80.97%, es decir, sigue sin existir una diferencia considerable entre los resultados de un modelo y otro.

## Capítulo 5. Bibliografía

[1] Gustavo F. Merlone. 2003, "La Siderurgia". Posgrado de Siderurgia, U.T.N. Facultad Regional Buenos Aires, pp 1-4 y 23-26.

[2] José L. Maldonado F. 1996, "Aceros y sus aplicaciones". Tesis para obtener el grado de Maestro En Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales. Universidad Autónoma de Nuevo León, pp 47.

[3] Delgado J. A. 2011, "Modelado matemático de la incidencia de un jet gaseoso en un baño bifásico". Tesis para obtener el grado de Ingeniero Químico Metalúrgico. Universidad Nacional Autónoma de México, pp 3-4.

[4] Yogeshwar Sahai. 2016, "Tundish Technology for Casting Clean Steel: A Review". Springer Metallurgical and Materials Transactions B, 47, pp. 295–316.

[5] North American Mixing Forum, Edward L. Paul, Victor Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta. 2003, "Handbook of industrial mixing. Science and practice". Wiley-Interscience, pp 5-14.

[6] Delgado J. A. 2014, "Modelado matemático de un dispositivo mezclador de aleaciones". Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencia e Ingeniería de Materiales. Universidad Nacional Autónoma de México, pp 19-30 y 46-50.

[7] Cano J. A. 2014, "Evaluación del mezclado mediante transporte de trazadores en reactores de flujo oscilatorio utilizando CFD". Tesis para obtener el grado de Ingeniero Industrial. Universidad Politécnica de Cartagena, pp 10-16.

[8] Mazumdar, D., Guthrie, R.I.L. 1999, "The Physical and Mathematical Modelling of Continuous Casting Tundish Systems". ISIJ International, 39, pp. 524-547.

[9] Mazumdar, D., Korla, S.C., Kumar, A. 2010, "Physical and Mathematical Modelling of Steelmaking Tundish Operations: A Review of the Last Decade (1999–2009)". ISIJ International, 50 pp. 331–348.

[10] Mazumdar, D. 2019, "Review, Analysis, and Modeling of Continuous Casting Tundish Systems". ISIJ International, 79, pp. 524-547.

- [11] H. Scott Fogler. 2004, "Elements of Chemical Reaction Engineering", 3rd Edition, Prentice-Hall, pp. 809-850.
- [12] Bodalo A. 2000, "Estudio experimental del tipo de flujo en un reactor tanque continuo agitado", Revista de la universidad de Murcia, pp. 125-142.
- [13] Koitzsch R., Odenthal H. J., Pfeifer H. 2007. "Concentration Measurements in a Water Model Tundish using the Combined DPIV/PLIF Technique". Steel Research International, 78 No. 6, pp. 473-481.
- [14] Kaiser S. 2009, "PIV and PLIF to Evaluate Mixture Formation in a DirectInjection Hydrogen-Fuelled Engine". SAE International Journal of Engines, 1 No. 1, pp. 657-668.
- [15] Iván R. Flores. 2009, "Modelado Físico de la Fluidinámica durante la desgasificación de Al por la Técnica del Rotor- Inyector". Tesis para obtener el grado de Ingeniero Químico Metalúrgico. Universidad Nacional Autónoma de México, pp 19-20 y 28-31.
- [16] Acebo-González. 2013, "Los métodos Turbidimétricos y sus aplicaciones en las ciencias de la vida". Revista CENIC. Ciencias Biológicas, vol. 44, pp 1-3.
- [17] Kai-Erik P, Mylly A, Priezhev V. 2009, "Optical Measurement Techniques, Innovations for Industry and the Life Sciences". Springer Series in Optical Sciences, pp 94-95.
- [18] Theofanis L, Christos A, Christos P A. 2009, "Nephelometric Turbidity System for Monitoring Residential Drinking Water Quality". University Cyprus, Nicosia, Cyprus, pp 5-13.
- [19] Y. Sahai y T. Emi. 1996, "Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes". ISIJ International, vol. 36, pp 667-668.

## Capítulo 6. Apéndices

### 6.1 Lista de figuras

**Figura 1.** Esquema de las rutas de producción del acero [3]

**Figura 2.** Esquema general del acomodo de los reactores en la colada continua

**Figura 3.** Esquema para la medición de curvas RTD en un reactor estacionario [6][11]

**Figura 4.** Respuesta a la inyección de un pulso de trazador en un reactor con entrada y salida única [6][11]

**Figura 5.** Tipos de curvas 'C' más comúnmente obtenidas [6][11]

**Figura 6.** Esquema general de una Curva 'F' [9]

**Figura 7.** Esquema general de un sistema para medir la turbidez [16]

**Figura 8.** Curvas C medidas experimentalmente en un modelo acuoso de un tundish a escala reducida y prototipo del sistema real a escala completa con y sin modificadores de flujo [8]

**Figura 9.** Sistema del modelo físico usado por Koitzsch y colaboradores para la experimentación de su artículo. Contiene un brazo flexible, laser, cámaras, sistema de cómputo, sistema de PIV y el modelo de acrílico [13]

**Figura 10.** Vista frontal y lateral de a) modelo usado en el artículo de Koitzsch y colaboradores, tundish de una entrada y un hilo de salida, b) modelo usado en la tesis presente, tundish de una entrada y un hilo de salida, c) modelo usado en la tesis presente, tundish de una entrada y dos hilos de salida

**Figura 11.** Modelo físico de acrílico de un tundish con escala 1:3

**Figura 12.** Esquema general de la configuración usada en esta tesis para la simulación del modelo físico de un distribuidor de colada continua

**Figura 13.** Soldadura por arco eléctrico de 2 perfiles de acero a la estructura principal para darle mayor soporte y estabilidad

**Figura 14.** Travesaño para rotámetro y manguera

**Figura 15.** Base para la bomba y el rotámetro

**Figura 16.** Mesa elevadora con estructura para sostener la conexión manguera-buza

**Figura 17.** Travesaño y estructura en 'T' para sostener la conexión manguera-buza

**Figura 18.** Buza construida con tubo PVC para el presente trabajo

**Figura 19.** Sostén para la buza

**Figura 20.** Sostén para la buza colocado encima del modelo

**Figura 21.** Patrones preparados para realizar la curva de calibración utilizada en la técnica de turbidimetría

**Figura 22.** Curva de calibración de diluciones para experimento de turbidimetría con pintura blanca acrílica al 45% m/m como trazador

**Figura 23.** Toma de muestras durante el experimento de turbidimetría

**Figura 24.** Sistema completo armado y conectado para modelación física en un distribuidor de colada continua por la técnica de turbidimetría a) Tinaco de alimentación b) Base de bomba y rotámetro, c) Travesaño para la entrada de la buza, buza y sostén de la buza, d) Modelo escalado de un distribuidor de colada continua, e) Mesa elevadora f) Salida al desagüe

**Figura 25.** Segmentos que comprenden el sistema para el modelado físico en un distribuidor de colada continua por la técnica de turbidimetría a) Tinaco de alimentación b) Base de bomba y rotámetro c) Travesaño para la entrada de la buza, buza, sostén de buza, modelo de acrílico de un tundish escalado y meza elevadora

**Figura 26.** Curva RTD o C que muestra la concentración adimensional ( $C_\theta$ ) contra el tiempo adimensional ( $t_\theta$ ) del experimento realizado a) en un modelo de 1 hilo b) en un modelo de 2 hilos

**Figura 27.** Comparación entre ambas curvas C obtenidas en los experimentos con modelos de distribuidores de colada continua de 1 y 2 hilos

**Figura 28.** Líneas de flujo que muestran las zonas de recirculación a) modelo de un distribuidor de 1 hilo en el artículo de Koitzsch que muestra al menos 2 recirculaciones b) modelo de distribuidor de 2 hilos en el artículo de Mazumdar que muestra al menos 4 recirculaciones [9] [13]

**Figura 29.** Deducción de las posibles líneas de flujo en el experimento de turbidimetría para el modelo de 1 hilo a los a) 1.47 seg b) 2.35 seg c) 3.5 seg d) 6.45 seg e) 12.06 seg

**Figura 30.** Deducción de las posibles líneas de flujo en el experimento de turbidimetría para el modelo de 2 hilos a los a) 0.1 seg b) 0.29 seg c) 0.99 seg d) 1.52 seg e) 2.5 seg

**Figura 31.** Comparación entre los resultados del artículo de Koitzsch [13] con su modelo y los resultados experimentales obtenidos en turbidimetría para el modelo de 1 hilo

## 6.2 Lista de tablas

**Tabla 1.** Dimensiones del sistema real y los modelos físicos en centímetros (cm)

**Tabla 2.** Criterios de similitud y variables de interés usados en los modelos vs el sistema real

**Tabla 3.** Materiales y equipos usados en la construcción del modelo

**Tabla 4.** Materiales y equipos usados en la experimentación para medir el mezclado químico dentro del modelo

**Tabla 5.** Resultados de las pruebas experimentales para un modelo de 1 y 2 hilos