



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

División de Ingenierías
Maestría en Ciencias del Agua

"ANÁLISIS DE LA MEZCLA DE CLORO EN CRUCEROS DE REDES DE AGUA POTABLE"

TESIS

Que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

Presenta:

DANIEL HERNÁNDEZ CERVANTES

Director:

Dr. José de Jesús Mora Rodríguez

Co-director:

M.I. Martín Rubén Jiménez Magaña

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por marcarme el camino para alcanzar este día y permitirme sobrellevar cualquier adversidad para continuar.

En especial agradezco a **Michelle y mi hijo Sebastián**, quienes son mi principal motivo para seguir superándome y pensar en el mañana. Soy una persona afortunada por poder tener una familia con la que cuento incondicionalmente.

A **mis padres, a mis hermanos y a toda mi familia**, por acompañarme en todo momento y ser mi guía y ejemplo, por fortalecer los valores que me integran como persona y estudiante.

A **mi director de tesis**, el **Dr. José de Jesús Mora Rodríguez**, por compartirme su notable conocimiento como investigador, por haberme permitido trabajar desde licenciatura en congresos, asignaturas y cursos, por fortalecer en gran manera este tema de investigación y cimentar los puntos para seguir desarrollándolo.

A **mi co-director**, el **M.I. Martín Rubén Jiménez Magaña**, por las ideas y conceptos que deben considerarse en la experimentación y hacer de la observación y análisis su clave para promover cualquier estudio. Es un gusto contar con un modelo ideal de persona positiva y capaz.

A mi sinodal, **Dr. José Luis Nava Montes de Oca**, por infundirme que tu trabajo siempre será fundamentado mediante cuestionamientos, validación y conocimiento multidisciplinar desde las bases. Por inculcarme que un investigador debe conducirse siempre con ética, con objetivos claros y que debe pensar siempre en grados mayores.

A mi sinodal, **Dra Xitlali Virginia Delgado Galván**, por su apoyo en este camino, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo y compartirme todos sus conocimientos, técnicas y consejos a lo largo de mi profesión.

A mi sinodal, **M.I. Josefina Ortiz Medel**, por sus consejos y apoyo tanto profesionales como personales. De igual manera, por permitirme trabajar en su entorno de trabajo y fortalecerme con su modelo como docente y como una persona competente.

A la **Dra. Petra Amparo López Jiménez**, profesora de la Universidad Politécnica de Valencia. Por su importante aporte y guía en los cimientos de este estudio. Por su desplegar su calidad en conocimiento y su notoria aptitud como investigadora en un corto tiempo de estancia académica, el cual resultó significativo para el desarrollo de este trabajo.

Al **M. en C. Mario Rosales Retana**, por su valioso apoyo en la realización de los experimentos, por introducirme en sus técnicas y conceptos notablemente adecuados en su método de trabajo en experimentación y simulación.

A **Rúben García**, por su soporte en la implementación de los dispositivos experimentales. Su manera e ingenio de hacer las cosas demuestran que es una persona que se desempeña con aptitud y calidad en su trabajo.

A mis amigos y compañeros de maestría, me faltó integrarme más a sus eventos, pero son de lo más chéveres.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
HIPÓTESIS	9
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVOS PARTICULARES.....	9

CAPÍTULO I

1. CALIDAD DEL AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.....	11
1.1. CONCEPTO DE CALIDAD DEL AGUA.....	11
1.1.1. Problemática en la calidad del agua.....	11
1.2. DESINFECCIÓN DEL AGUA POR CLORACIÓN.....	18
1.2.1. Etapas de la desinfección por cloro.....	19
1.2.2. Mecanismos de decaimiento del cloro.	20
1.2.3. Métodos de aplicación del cloro.	21
1.3. CONCEPTOS PARA SIMULACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA.....	22
1.3.1. Mecanismos de transporte.	22
1.3.3. Modelación del decaimiento de cloro en tuberías.....	25
1.4. TÉCNICA DE ESTÍMULO RESPUESTA PARA LA OBTENCIÓN DE CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA.....	27

CAPÍTULO II

2. MEZCLA EN CRUCEROS	29
2.1. MODELO DE MEZCLA COMPLETA E INSTANTÁNEA.....	29
2.2. ALGORITMO DE TRANSPORTE LAGRANGIANO.....	30
2.3. ESTADO DEL ARTE DEL MODELADO DE MEZCLA COMPLETA E INSTANTÁNEA.	31

CAPÍTULO III

3. SIMULACIÓN HIDRÁULICA Y DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	38
3.1. SIMULACIÓN HIDRÁULICA.....	38
3.1.1. Ecuaciones fundamentales.....	39
3.1.3. Análisis en régimen permanente.....	46
3.1.4. Análisis en régimen no permanente.	46
3.1.5. Análisis en régimen transitorio.....	47
3.1.6. Programas de cómputo para análisis de redes.	47
3.2. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	48

3.2.1.	Ecuaciones fundamentales de mecánica de fluidos.....	48
3.2.1.1.	Ecuación de continuidad en tres dimensiones.....	49
3.2.1.2.	Ecuación del Momentum en tres dimensiones.....	50
3.2.1.3.	La ecuación de la energía en tres dimensiones.....	53
3.2.2.	Ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido Newtoniano.	54
3.2.3.	Turbulencia y su modelación.....	57
3.2.4.	Modelos de turbulencia	59

CAPÍTULO IV

4.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE MEZCLA	64
4.1.	ESCENARIOS DE HIDRODINÁMICA.....	64
4.1.1.	Hidrodinámica experimental.....	64
4.1.2.	Hidrodinámica en CFD.....	72
4.2.	MODELO DE TRANSPORTE DE SOLUTO	77
4.2.1.	Transporte experimental, método empleado	77
4.3.	ESCENARIOS DEL TRANSPORTE DE SOLUTO	84
4.3.1.	Validación del modelo CFD.....	85
4.3.2.	Escenarios para el análisis de la mezcla en cruceros mediante CFD.....	86

CAPÍTULO V

5.	RESULTADOS Y COMPARATIVAS	91
5.1.	VALIDACIÓN DEL MODELO CFD.....	91
5.1.1.	Validación hidrodinámica	91
5.1.2.	Validación de transporte de soluto	98
5.2.	ANÁLISIS DE MEZCLA EN CRUCEROS	112
5.2.1.	Aproximación hidrodinámica de los 12 escenarios.....	112
5.2.2.	Simulación de transporte de especies diluidas para escenarios propuestos.....	115
5.3.	Obtención de las concentraciones a las salidas mediante el coeficiente S.....	127
5.3.1.	Ejemplo de estimación de concentraciones con mezcla incompleta en una red de abastecimiento de agua	128
	CONCLUSIONES	133
	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	136
	REFERENCIAS:	137

INTRODUCCIÓN

Este trabajo está inspirado en proporcionar una solución a los diversos problemas que conllevan el inadecuado uso del cloro como desinfectante del agua potable. Actualmente, numerosos sectores de redes de abastecimiento de agua potable se encuentran en condiciones desfavorables de funcionamiento y operación. Estos factores afectan el desempeño hidráulico de la red y favorecen los procesos corrosivos de desgaste de los materiales que componen el sistema. Estas situaciones dan lugar a la presencia de contaminantes en el agua, cuyo principal problema radica en el posible consumo por los usuarios del servicio.

El agua para consumo humano ha sido definida en las "Guías para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS)", como aquella "adecuada para consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal". En esta definición está implícito que el uso del agua no debería presentar riesgo de enfermedades a los consumidores (Rojas, 2002).

No obstante, la calidad del agua no es suficiente para asegurar beneficios a la salud humana; es necesario que adicionalmente se satisfagan tres aspectos: cantidad, continuidad y costo razonable. Al margen de las responsabilidades del abastecedor, los consumidores deben tener conocimientos sobre el uso apropiado del agua, de la adecuada nutrición e higiene de los alimentos, así como de la correcta disposición de excrementos. Precisamente, los mensajes dirigidos a mejorar los hábitos y costumbres relacionados con el buen uso del agua, deben realizarse a través de programas educativos y en forma complementaria a las actividades propias del abastecedor para evitar la creencia de que la calidad del agua por sí sola, previene las enfermedades.

El agua de calidad apta para consumo humano cuando entra al sistema de distribución puede deteriorarse antes de llegar al consumidor. En el sistema de distribución, la contaminación del agua puede ocurrir por tuberías rotas, hidrantes contra incendio, conexiones domiciliarias, cisternas, tanques defectuosos y durante el tendido de nuevas tuberías o reparaciones hechas con pocas medidas de seguridad. Un factor de recontaminación, de gran importancia en las ciudades o localidades donde existe déficit de agua y mala infraestructura, es la interrupción del suministro como resultado de la rotación del servicio de una a otra área de abastecimiento con el fin de atender la demanda de agua. Otro factor es debido al suministro diurno en sitios donde no es posible mantener un abastecimiento las 24 horas del día debido a un excesivo consumo de energía eléctrica. Ambos factores reacen en largos tiempos de residencia, que facilitan los ambientes de proliferación bacteriana en las tuberías y conexiones.

De esta manera, en sistemas donde el servicio de abastecimiento de agua es restringido, las características físicas, químicas y principalmente microbiológicas, al nivel de las viviendas, es frecuente su deterioro como consecuencia del manipuleo y almacenamiento inadecuado.

A través del tiempo se han realizado diversas investigaciones para tomar medidas que afronten la problemática de la calidad del agua. Uno de los resultados es el empleo de agentes químicos para la eliminación de contaminantes y desinfección del agua, siendo de los más recurridos, el cloro. Sin embargo, es

sumamente requerido un estricto control en el uso de estos compuestos, debido en parte a sus efectos reactivos con los materiales de la red, como también la formación de subproductos químicos que similarmente afectan a la población consumidora.

Debido a que las redes de distribución de agua son a menudo de gran extensión y para su construcción, requieren una inversión importante de capital, no es factible volver a configurarlas para obtener esquemas hidráulicos favorables que mejoren la distribución de los desinfectantes, el único aspecto a considerar en el diseño de una red en relación a la calidad es que la velocidad del agua no debe estar por debajo de un mínimo que genere zonas de estancamiento, sin embargo esta restricción se realiza para el caudal máximo horario, sin tomar en cuenta que gran parte del tiempo el caudal de circulación será entorno al medio. Ante tal adversidad, ciertas zonas del sistema quedan vulnerables a quedar con deficientes cantidades de cloro necesario para realizar su obra de desinfección. Para contrarrestar este escenario, se recurre al aumento de dosificación de cloro desde las fuentes, provocando un esquema desequilibrado de concentraciones. Con lo anterior, algunos sectores tienden a concentrar mayor cantidad de cloro que otros y siendo conexiones de demanda, se distribuye a los usuarios de manera inadecuada.

Las estaciones de reinyección de cloro son recintos de ingeniería aptos para almacenar y manejar el rebombeo de cloro a la red. La adición de cloro necesario hace factible el contar con la cantidad suficiente del desinfectante en zonas vulnerables a bajas concentraciones. Sin embargo, la configuración de la red y su funcionamiento posiblemente dificulten la localización estratégica para la estación de reinyección. Derivar la mejor posición para emplazar una estación de reinyección se vuelve un trabajo con diversos parámetros a considerar.

La simulación de calidad del agua por ordenador es una gran herramienta que hace posible realizar ensayos para diferentes condiciones de uso del desinfectante en la red. Con ello, se facilita la predicción de situaciones de riesgo ante la ausencia de cloro y un posible brote de contaminantes a través de las tuberías.

Diversas fuentes han puesto especial énfasis en uno de los procesos realizados en los programas de simulación de calidad del agua. El proceso evalúa la mezcla de sustancia que es llevada a cabo en las uniones donde se concentran caudales de entrada y se distribuyen en uno o varios caudales de salida. La manera en que se realiza esta simulación es denominada "Mezcla completa e instantánea". Describe que las concentraciones que arriban a la unión de tubería se mezclan uniformemente, distribuyendo el concentrado en igual proporción a los caudales de salida. Sin embargo, los autores han descrito que estos procesos de mezcla se llevan a cabo de manera "incompleta", por lo que han puesto en cuestión la precisión con la que es realizada la simulación de calidad del agua.

Las técnicas heurísticas inspiradas en los procesos biológicos han sido utilizadas desde los años 90 para diversos problemas de redes de agua potable. Mencionando algunos, están la optimización de redes, detección de fugas, y también la ubicación de estaciones de reinyección. Los Algoritmos Genéticos (AG) y la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO por sus siglas en inglés) son técnicas heurísticas que realizan búsquedas avanzadas en la implicación de diversas variables que componen un problema.

El presente estudio presenta una validación del fenómeno de mezcla en uniones de tubería mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) con la que se verificará la distribución del desinfectante a través de varios tipos de uniones. Realizar estos ensayos permitirá derivar funciones matemáticas que cuantifiquen el grado de mezcla que es llevada a cabo en las uniones y posteriormente incorporarse a los programas de cómputo de calidad del agua. Contar con un modelo numérico con mayor precisión favorecerá la predicción en la distribución de cloro a través del sistema de agua potable.

Se busca contar con una herramienta que contribuya a la optimización del uso de cloro en redes de abastecimiento de agua potable. Hacer un uso eficiente del desinfectante hace posible alcanzar el objetivo de evitar riesgos por consumo de agua contaminada y proveer de un servicio en mejor disposición para la población.

HIPÓTESIS

El modelo de mezcla "completa e instantánea" no representa los diversos casos de mezcla de caudales en uniones de cruz de tubería. Lo cual repercute en la precisión de los escenarios numéricos de la distribución del desinfectante y consecuentemente en la representación del mismo para diferentes condiciones de operación.

OBJETIVO GENERAL

Implementar la modelación de la mezcla en cruceros mediante Dinámica de Fluidos Computacional y realizar un análisis de la distribución mezclada a diferentes condiciones de operación

OBJETIVOS PARTICULARES

- Mejorar la comprensión de los métodos de cálculo de programas de simulación hidráulica, así como en Dinámica de Fluidos Computacional.
- Evaluar el modelo de "mezcla completa e instantánea" y determinar la diferencia existente con el cálculo por "mezcla incompleta".
- Determinar algunas funciones de aproximación que permitan el cálculo de la concentración a las salidas de un cruceo dadas sus condiciones de entrada
- Disminuir riesgos a los usuarios por consumo de agua contaminada debido al inadecuado uso del desinfectante cloro.

CAPÍTULO 1

1. CALIDAD DEL AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

1.1. CONCEPTO DE CALIDAD DEL AGUA.

El agua para consumo humano ha sido definida en las guías para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS), como aquella "adecuada para consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal". En esta definición está implícito que el uso del agua no debería presentar riesgo de enfermedades a los consumidores (Rojas, 2002).

No obstante, la calidad del agua no es suficiente para asegurar beneficios a la salud humana; es necesario que adicionalmente se satisfagan tres aspectos: cantidad, continuidad y costo razonable. Al margen de las responsabilidades del abastecedor, los consumidores deben tener conocimientos sobre el uso apropiado del agua, de la adecuada nutrición e higiene de los alimentos, así como de la correcta disposición de excrementos. Precisamente, los mensajes dirigidos a mejorar los hábitos y costumbres relacionados con el buen uso del agua, deben realizarse a través de programas educativos y en forma complementaria a las actividades propias del abastecedor para evitar la creencia de que la calidad del agua por sí sola, previene las enfermedades.

El agua de calidad apta para consumo humano cuando entra al sistema de distribución puede deteriorarse antes de llegar al consumidor. En el sistema de distribución, la contaminación del agua puede ocurrir por tuberías rotas, hidrantes contra incendio, conexiones domiciliarias, cisternas, tanques defectuosos y durante el tendido de nuevas tuberías o reparaciones hechas con pocas medidas de seguridad. Un factor de recontaminación, de gran importancia en las ciudades o localidades donde existe déficit de agua y mala infraestructura, es la interrupción del suministro como resultado de la rotación del servicio de una a otra área de abastecimiento con el fin de atender la demanda de agua. Otro factor es debido al suministro diurno en sitios donde no es posible mantener un abastecimiento las 24 horas del día debido a un excesivo consumo de energía eléctrica. Ambos factores reacen en largos tiempos de residencia, que facilitan los ambientes de proliferación bacteriana en las tuberías y conexiones.

De esta manera, en sistemas donde el servicio de abastecimiento de agua es restringido, las características físicas, químicas y principalmente microbiológicas, al nivel de las viviendas, es frecuente su deterioro como consecuencia del manipuleo y almacenamiento inadecuado.

1.1.1. Problemática en la calidad del agua.

La calidad del agua de consumo depende de la integridad de la red de distribución. Mantener los niveles adecuados de calidad se vuelve una tarea primordial, debido al impacto que conlleva para la salud de

los consumidores (Mora, 2011). El consumo de agua contaminada se ve reflejado en los casos que son reportados por enfermedades epidémicas; no obstante en la mayoría, no se tiene conocimiento del origen de la contaminación del agua, ni del evento que la genera y sobre todo, ni de la entrada del contaminante. Es por ello la importancia de esta línea de investigación, y las aportaciones que se dan para generar más conocimiento en este tipo de eventos.

Dado que la calidad del agua puede mejorarse mediante el tratamiento adecuado de la misma, la disponibilidad hídrica se mantiene a través de la aplicación correcta de las operaciones de tratamiento y la gestión integral de los sistemas de distribución (Mompremier, 2015). El tratamiento del agua ha contribuido a la prevención de las enfermedades transmitidas por esta vía y para proteger la salud humana mediante el consumo de agua potable. El suministro de agua potable ha desempeñado un papel fundamental en la disminución de la incidencia de muchas enfermedades infecciosas transmitidas por el agua o relacionadas con ella (del Puerto, 1999).

La calidad del agua para consumo humano en las redes de distribución de agua potable es un asunto que interesa las sociedades en el mundo por su relación con la salud pública (Mompremier, 2015). Lo que justifica el amplio desarrollo de los modelos de análisis en este aspecto.

1.1.1.1. Enfermedades transmitidas en la distribución de agua en redes.

El principal problema de la deficiencia en la calidad del agua es que genera problemas de salud, dando lugar a brotes de enfermedades causadas por su consumo (Mora 2011). Las enfermedades relacionadas con el consumo de agua tienen una gran repercusión en la preservación de la salud de la población, y por ello debe asegurarse que su calidad sea la adecuada.

Existen diversas enfermedades que pueden ser transmitidas por el agua. En dichas enfermedades, los microorganismos patógenos ingresan a través del cuerpo de un ser vivo por medio del agua ingerida. En otras palabras, pueden categorizarse como aquellas originadas por organismos microbiológicos y aquellas producidas por sustancias tóxicas inanimadas suspendidas o disueltas en el agua.

La siguiente tabla 1, es un fragmento reducido tomado del libro: "Agua y Salud Humana" del autor F. Eugene McJunkin, (1988) que resume, en gran parte, algunas de las enfermedades a causa de la conducción de agua con mala calidad, pero además existen muchos otros padecimientos sanitarios debidos a este problema, la mayoría de ellos vienen descritos detalladamente en dicho documento de la siguiente manera:

- Enfermedades relacionadas con la higiene y el agua.
- Enfermedades producidas por contacto por el agua.
- Enfermedades transmitidas por vectores de hábitat acuático.
- Entre otros.

Tabla 1. Enfermedades transmitidas a través del agua (McJunkin, 1988).

Fuentes microbiológicas enfermedad o síndrome	Vías de tipo fecal-oral
--	--------------------------------

<p><i>Disentería amébrica</i> (Amebiasis)</p>	<p>Epidémicamente es transmitida principalmente a través del agua, endémicamente se propaga a través del agua, alimentos y contacto mano-a-boca.</p>
<p>Ascariasis (Lombriz gigante)</p>	<p>Es resistente a la cloración. Generalmente transmitida a través del suelo, pero también en ocasiones por el agua.</p>
<p><i>Disentería bacilar</i></p>	
<p>(Shigellosis)</p>	<p>También a través de comidas, leche, moscas y contacto directo.</p>
<p>Disentería balantidial</p>	<p>Epidémicamente, principalmente a través del agua. Endémicamente, a través</p>
<p>(Balantidiasis)</p>	<p>de agua, comidas y moscas.</p>
<p>Enteritis</p>	<p>Sólo recientemente se le ha reconocido como una causa importante de la</p>
<p>campilobacteriana</p>	<p>diarrea pediátrica.</p>
<p><i>Cólera</i></p>	<p>Enfermedad clásica transmitida por el agua. Actualmente pandémica. Alto</p>
<p>(Clásico y El tor)</p>	<p>índice de mortalidad en los casos no tratados.</p>
<p>Coccidiosis</p>	<p>Rara, benigna.</p>
<p><i>Diarreas</i></p>	<p>Síndromes clínicos de etiología variada, generalmente no identificada; ataca</p>
<p>(Incluye diarreas</p>	<p>especialmente en los países menos desarrollados donde aparece con</p>
<p>infantiles y gastroenteritis)</p>	<p>frecuencia como una de las principales causas de muerte. Principalmente de</p>
<p></p>	<p>vía fecal-oral.</p>
<p></p>	<p></p>
<p><i>E. coli</i></p>	<p>Creciente comprensión de su rol en las diarreas de niños y viajeros.</p>
<p>(Enteroinvasiva,</p>	<p>Muchos son patógenos. Su rol no es bien comprendido. Pueden causar</p>
<p>enteropatógena</p>	<p>enfermedades del sistema nervioso central.</p>
<p>y enterotóxica)</p>	<p></p>
<p>Virus entéricos</p>	<p></p>
<p></p>	<p></p>
<p></p>	<p></p>
<p></p>	<p></p>
<p><i>Giardiasis</i></p>	<p>Recibe cada vez mayor atención. Es resistente a la cloración.</p>
<p>Virus de hepatitis A.</p>	<p>Varias rutas de transmisión. Incluyendo la fecal-oral. En 1955-56 se produjo</p>
<p></p>	<p>en Nueva Delhi una epidemia de 30,000 casos.</p>
<p></p>	<p></p>
<p></p>	<p></p>
<p>Anquilostomiasis y</p>	<p>Normalmente, la larva del suelo penetra en la piel desnuda, generalmente del</p>
<p>estrongiloidiasis</p>	<p>pie. También puede transmitirse por agua.</p>
<p>Enfermedad hidatídica</p>	<p>Se transmite mediante la ingestión de huevos infectados en agua y alimentos</p>
<p>(Echinococcosis)</p>	<p>contaminados por heces de perros.</p>
<p>Otros <i>vibriones aparte del</i></p>	<p>Cada vez más reconocidos como una causa de diarreas.</p>
<p><i>cólera</i></p>	<p></p>
<p><i>Infección viral Norwalk</i></p>	<p>Aparentemente, una causa significativa de diarreas.</p>
<p><i>Fiebre paratifoidea</i></p>	<p>Contacto directo o indirecto con heces y orina de paciente o portador.</p>
<p></p>	<p>Generalmente se propaga indirectamente a través de alimentos, especialmente</p>
<p></p>	<p>leche y mariscos, y ocasionalmente a través del suministro de agua.</p>
<p></p>	<p>Se ha observado transmisión vía agua en raras ocasiones.</p>
<p>Poliomielitis</p>	<p>Agente de diarrea infantil recientemente identificado. Probablemente fecal-</p>
<p><i>Infección de rotavirus</i></p>	<p>oral.</p>
<p></p>	<p></p>
<p><i>Salmonelosis</i></p>	<p>Enfermedad gastroenterítica aguda, infecciosa; generalmente se propaga a</p>
<p></p>	<p>través de alimentos contaminados con heces. Se sabe de epidemias</p>
<p></p>	<p>transmitidas por agua; por ejemplo, 15,000 casos en Riverside, California, en</p>
<p></p>	<p>1966, debido a la contaminación de un sistema público de agua.</p>
<p></p>	<p></p>
<p>Esquistosomiasis</p>	<p>Puede transmitirse a través del agua, pero la penetración por la piel es la</p>
<p></p>	<p>principal puerta de entrada.</p>
<p><i>Diarrea de viajeros</i></p>	<p>Frecuentemente causada por uno de los muchos serotipos de bacteria <i>E.</i></p>
<p>Tricuriasis</p>	<p><i>coli</i>.</p>
<p>(Lombriz latigoforme)</p>	<p>Generalmente se transmite por el suelo, pero ocasionalmente también por el</p>
<p></p>	<p>agua.</p>

<i>Fiebre tifoidea</i> Yersinosis	Se transmite a través de agua y alimentos contaminados. Los portadores urinarios son frecuentes en áreas con <i>S. hematobium</i> . De alcance mundial, pero escasamente reconocida.	
Otras vías		
<i>Enfermedad o síndrome</i>	<i>Observaciones</i>	
<i>Ántrax</i> <i>Brucellosis</i> <i>Cisticercosis</i> <i>(Lombrices de la vejiga)</i> <i>Gongilomiasis</i> <i>(Lombricilla filiforme escutiforme)</i> <i>Filariasis</i> <i>(Dracontiasis)</i> <i>Sanguijuelas (Hirudiniasis)</i> <i>Leptospirosis</i> <i>(Enfermedad de Weil)</i> <i>Enfermedad del tremátodo</i> <i>(Clonorchiasis y otras)</i> <i>Melioidosis</i> <i>Sparganosis</i> <i>Tularemia</i>	Transmisión por agua potable dudosa, aunque citada por varios autores. Documentada de manera muy escasa. Ingestión de los huevos a través de alimentos o agua. Infección larval con <i>T. solium</i> . Otras vías de transmisión. Enfermedad grave. Rara. Ingestión de agua que contiene larvas de insectos huéspedes desintegrados. Ruta de transmisión compleja con vector intermedio (ciclópodo). No utiliza vía fecal-oral. Se encuentra sólo en los países en vías de desarrollo y se transmite sólo por agua. Infestación a través de sanguijuelas acuáticas de corta edad. Una zoonosis. Su transmisión más frecuente es por el contacto de la piel con agua contaminada. Ocasionalmente por ingestión de agua potable que contiene metacercaria de pescado descompuesto. La mayoría de casos se da por comer pescado crudo. Rara. Presentada en el sudeste asiático. Ingestión de agua que contiene ciclópodos infectados con ciertas larvas cestodas. Otras rutas de transmisión. Ingestión de agua no tratada de cuencas donde dicha infección predomina entre los animales silvestres; los conejos constituyen uno de los varios mecanismos de transmisión.	
Fuentes químicas y otros.		
<i>Fuente</i>	<i>Enfermedad o síndrome</i>	<i>Observaciones</i>
-----	Bocio endémico, asbestosis y mesotelioma Hipertensión	Agua deficiente en yodo o con bocjógenos. Se sabe que el asbesto en los pulmones produce cáncer. Aún no se conoce su efecto en el tracto intestinal. Se requieren dietas bajas en sodio para ciertos sectores de la población.

En varios países de América Latina y el Caribe, las enfermedades diarreicas agudas figuran entre las 10 causas principales de defunción y son responsables de miles de muertes por año, sin incluir otras similares (del Puerto, 1999). Una enfermedad que constituye un importante problema de salud en las zonas urbanas y rurales de todo el mundo es la hepatitis A, la cual es producida por un virus, y se presenta en forma esporádica y epidémica, con tendencia a recurrencia cíclica, guardando estrecha relación con el deficiente saneamiento ambiental. El agua contiene frecuentemente cientos de microorganismos perjudiciales para la salud y la vida de las personas (ARA, 2002). La diarrea, originada en un 30 por ciento de los casos por el agua, causa una grave deshidratación y desnutrición, y casi 3 millones de niños menores de cinco años en el planeta mueren por esta causa, lo que representa la cuarta parte de muertes en este grupo de edad (Mompremier, 2015).

1.1.1.2. Crecimiento bacteriano en redes de agua potable.

Los sistemas de almacenamiento y distribución de agua potable constituyen un ambiente idóneo para la proliferación bacteriana; el flujo de agua favorece el transporte de nutrientes y bacterias, mientras que las paredes de las tuberías y las partículas presentes en el agua sirven de superficie adherente para los microorganismos (Knobelsdorf, 1997). Los microorganismos adheridos tienen una mayor eficacia para absorber nutrientes y además son más resistentes a los ambientes adversos tales como la escasez de nutrientes y la presencia de desinfectantes.

El crecimiento bacteriano en los sistemas de almacenamiento y distribución de agua potable produce un deterioro de la calidad del agua, alterando su sabor y olor, aumentando su turbiedad e incluso llegando a afectar su conformidad con las normas microbiológicas de calidad (Knobelsdorf, 1997).

Las bacterias son los organismos vivos más numerosos que existen, por lo mismo están presentes casi en todas partes, el agua subterránea no es la excepción, por este motivo es necesario realizar pruebas bacteriológicas para determinar el grado de contaminación que tiene la misma (Gramajo, 2004). El agua de la red puede contener pequeñas contaminaciones de aguas negras, las cuales no pueden ser detectadas mediante análisis físicos o químicos, en cambio, las pruebas bacteriológicas se han diseñado de tal manera que puedan detectarlas.

Se reconoce que el agua es uno de los principales vehículos transportadores de microorganismos causante de enfermedades provenientes del aparato digestivo del hombre y de otros animales. Las coliformes fecales son un grupo grande de microorganismos, habitantes usuales de los intestinos de los animales superiores. Estos microorganismos son de fácil identificación comparados con los microorganismos patógenos, que normalmente se encuentran en mucho menor número y cuya identificación es laboriosa. La presencia de coliformes en una muestra no siempre indica que el agua está contaminada con microorganismos patógenos, sino que, en términos estadísticos, su concentración puede y debe servir como parámetro para alertar sobre la existencia de contaminación fecal y de microorganismos patógenos (Guimarães, 2001).

Los microorganismos patógenos están relacionados con enfermedades específicas de transmisión hídrica (Guimarães, 2001). La fiebre tifoidea, las fiebres paratifoideas, la disentería bacteriana y el cólera son causadas por bacterias, la amibiosis o disentería amebiana por protozoarios, la esquistosomosis por gusanos (helmintos) y larvas, en tanto que ciertos virus originan la hepatitis infecciosa y la poliomielitis.

Las fuentes de abastecimiento de agua contienen compuestos orgánicos capaces de promover el crecimiento bacteriano en el sistema de distribución, incluso después de la desinfección final a la que se somete al agua durante su potabilización. Este desarrollo bacteriano depende fundamentalmente del contenido de materia orgánica biodegradable y de nutrientes inorgánicos, además de la eficiencia del desinfectante residual.

1.1.1.3. Formación de la película bacteriana en tuberías

La presencia de una biopelícula en las redes de abastecimiento tiene importancia debido a la formación de productos que pueden deteriorar la calidad organoléptica del agua, o a la creación de problemas sanitarios derivados de la presencia de bacterias potencialmente patógenas que han conseguido sobrevivir a los procesos de potabilización.

La biopelícula (o película bacteriana) es un lecho viscoso que dificulta y reduce la penetración del cloro hacia sus capas interiores y por tanto actúa como barrera protectora de los microorganismos que allí se encuentran (Knobelsdorf, 1997). La película bacteriana se forma en las paredes de las tuberías y puede reducir la capacidad hidráulica de las mismas al acelerar su corrosión, además de hacer más difícil el mantenimiento de una concentración residual de desinfectante. El desarrollo y acumulación de la biopelícula en la pared de las tuberías es el resultado de al menos tres procesos:

- Transporte y adsorción de células en las paredes de las tuberías.
- Reproducción celular y formación de subproductos.
- Desprendimiento parcial de la biopelícula por efecto de la erosión y la pérdida de adherencia.

Una red de abastecimiento tiene dos fases diferenciadas que interactúan entre sí formando un ecosistema particular. Por un lado se encuentra el agua circulante, que sirve de medio de transporte para los nutrientes y las bacterias, y por otro están las paredes de las tuberías, donde ocurren fenómenos de fijación bacteriana y formación de la película biológica (Figura 1).

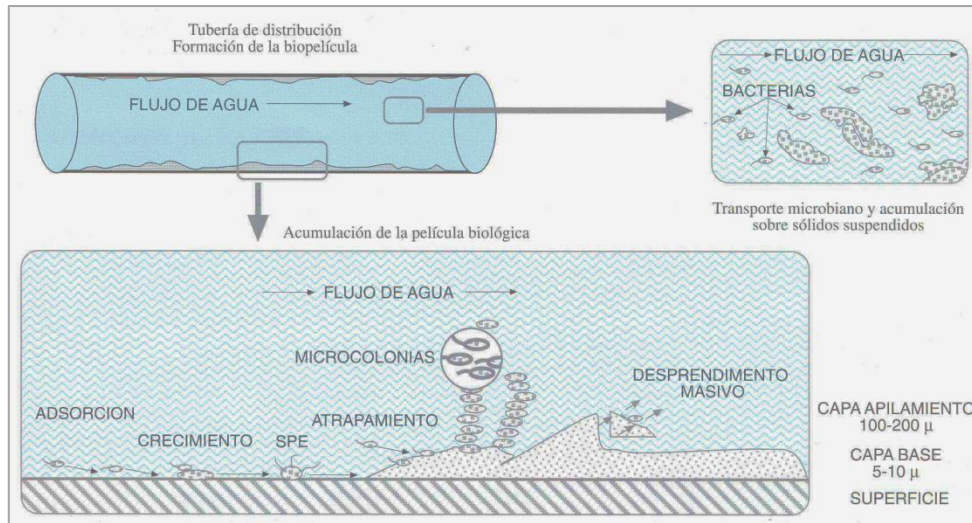


Figura 1. Proceso de crecimiento bacteriano sobre las paredes de las tuberías y las partículas suspendidas (Knobelsdorf, 1997).

El fenómeno de transporte de materia (nutrientes, oxígeno y desinfectante) en la biopelícula está limitado por la transferencia y difusión hacia el interior de la misma, así como por el consumo celular de oxígeno y de nutrientes (Figura 2). Las biopelículas pueden contener microorganismos aerobios y anaerobios

formando diferentes microambientes, en función de su accesibilidad al sustrato y al oxígeno (LeChevallier *et al.*, 1987).

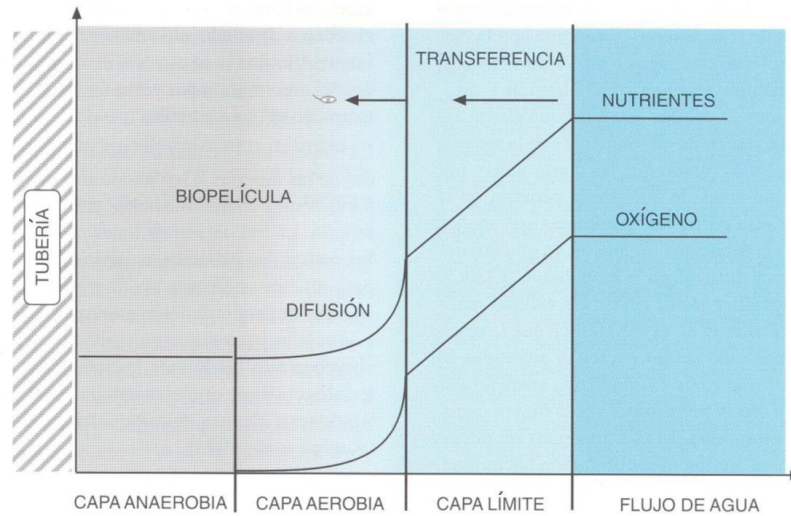


Figura 2. Transporte de los materiales en la biopelícula (Tejero, 1995).

La biopelícula continuamente está liberando células de su superficie, además de que se presenta un desprendimiento inducido por el esfuerzo cortante que genera el agua sobre su superficie. El desprendimiento aumenta con el incremento en la fuerza cortante, y este esfuerzo cortante influye en la fuerza de cohesión de la biopelícula así como en la de adhesión de los microorganismos.

La tabla 2 muestra la variedad de microorganismos que pueden encontrarse en una biopelícula.

Tabla 2. Organismos detectados en biopelículas (extraído de Gelves, 2005), Fuente Inicial: EPA; Junio 17, 2002. Health Risks From Microbial Growth and Biofilms in Drinking Water Distribution Systems. La abreviatura ssp corresponde a decir que varias especies conforman este género.

PATÓGENOS PRESENTES	EFFECTOS SOBRE LA SALUD	FUENTE
<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	Neumonía, meningitis, infecciones del tracto urinario, septicemia.	LeChevallier, 1987; Geldreich, 1990
<i>Aeromonas hydrophila</i>	Sepsis, enfermedades gastrointestinales, infecciones del tracto respiratorio.	Geldreich, 1990; Davis et al., 1973.
<i>Citrobacter</i> ssp*.	Septicemia, neumonía.	Geldreich, 1990; Keusch & Acheson, 1998; Davis et al., 1973
<i>Enterobacter</i> ssp*.	Septicemia, neumonía.	Geldreich, 1990; Keusch & Acheson, 1998; Davis et al., 1973

<i>Flavobacterium</i> ssp.	Septicemia, meningitis.	Davis et al., 1973; Geldreich, 1990
<i>Klebsiella</i> <i>pneumoniae</i> *	Septicemia, neumonía.	Keusch & Acheson, 1998.
<i>Maroxella</i> ssp.	Neumonía, conjuntivitis, septicemia, otitis, uretritis, meningitis, bronquitis, sinusitis.	Benenson, 1995; Davis et al., 1973; Walker 1998.
<i>M. avium</i> complex.	Diarrea crónica, enfermedad crónica en el pulmón.	Norton et al., 2000
<i>Pseudomonas</i> <i>cepacia</i>	Infecciones en los pies.	Geldreich, 1990; LeChevallier, 1987.
<i>Pseudomonas</i> <i>aeruginosa</i>	Infecciones con severas quemaduras, pulmones en la fibrosis cística, neumonía, meningitis.	Geldreich, 1990
<i>Serratia</i> <i>marcescens</i>	Septicemia, neumonía.	Geldreich, 1990; Davis et al., 1973.

1.2. DESINFECCIÓN DEL AGUA POR CLORACIÓN.

La cloración es la práctica universalmente empleada para la desinfección del agua desde hace mucho tiempo, por su economía y manejabilidad (Pérez, 2001). La experiencia ha demostrado que el cloro y sus compuestos son potencialmente activos desinfectantes para la destrucción de la flora bacteriana, especialmente para la de origen entérico.

El primer uso del cloro en un proceso continuo de cloración de aguas para beber se realizó en Europa (Bélgica) en 1902. Aunque en 1896 se usó hipoclorito en la base naval austrohúngara de Pola en el Adriático (Ara, 2002).

El cloro libre es el desinfectante más efectivo para las bacterias y demás microorganismos patógenos debido al efecto residual de desinfección que puede durar todo el recorrido del agua a través de la red y es suficiente para combatir estos problemas. No obstante, la actividad del desinfectante puede variar en función del estado en el que se presenten los microorganismos, su cohesión y mezcla con material disuelto, además de otros factores como temperatura y pH (Geldreich, 1996).

Las razones por las cuales es de suma ventaja el uso de cloro son (Pérez, 2001):

- Fácil aplicación.
- Bajo costo.

- Inocuo en las concentraciones necesarias en el agua para consumo humano.
- Facilidad para mantener un cloro residual en la red de distribución.
- Para prevenir la recontaminación del agua.

El cloro es usado como desinfectante para el control de microorganismos en aguas de consumo humano. Se puede usar como gas generado a partir de la vaporización de cloro líquido almacenado bajo presión en cilindros. Como líquido, comúnmente se presenta en soluciones de hipoclorito de sodio, NaOCl, y como sólido comúnmente hipoclorito de alto grado, HTH, o hipoclorito de calcio, Ca(OCl)₂. Tanto el cloro elemental gaseoso como el líquido, reaccionan con el agua de la siguiente forma (Gramajo 2004):



La desinfección con cloro es uno de los factores clave en los procesos de tratamiento de agua potable. Sin embargo, ésta puede provocar sabores y olores desagradables debido al cloro residual, la corrosión de las tuberías, la formación de subproductos como los trihalometanos (THM), entre otros (Ahn, 2012). Es por ello que la desinfección del agua mediante la cloración, está siendo objeto de polémica desde finales de los 90 o principios del siglo XXI, debido principalmente a los subproductos de la desinfección, llegando a cuestionarse la necesidad de la propia desinfección, en muchos casos (Quirós, 2005).

1.2.1. Etapas de la desinfección por cloro.

Cuando el cloro entra en contacto con el agua, se genera reacción con compuestos reductores, estos pueden ser sustancias disueltas o suspendidas. Los compuestos con los que actúa el cloro son el ácido sulfhídrico, el manganeso, el hierro y los nitritos. El cloro adicional comienza a reaccionar con materia orgánica, a partir de la cual se producen compuestos orgánicos de cloro, estos compuestos prácticamente no tienen la capacidad de desinfectar y generan un olor y sabor característico.

El cloro que se sigue agregando reacciona con las sustancias reductoras, la materia orgánica y el amoníaco. Finalmente, el cloro que se añade quedará como cloro residual libre disponible, el cual es un agente desinfectante muy activo. Una vez alcanzado este punto, todos los compuestos nitrogenados han sido destruidos y por lo tanto, cualquier adición posterior de cloro produce un incremento en el nivel de cloro libre del agua (AEAAS, 1984). Es por ello que el cloro decae una vez introducido en la red y existe el riesgo de que ciertas partes de ella queden desprotegidas, con el correspondiente riesgo para la salud de la población.

1.2.2. Mecanismos de decaimiento del cloro.

Una vez que se da el proceso de potabilización y se aplica el desinfectante, la calidad del agua tiende a disminuir debido a diferentes factores. La pérdida de la concentración de cloro residual a lo largo del sistema de distribución de agua se procesa principalmente por diversos mecanismos separados (Castro, 2003):

- Por reacción de cloro en el seno del líquido.
- Por desinfección de bacterias y otros microorganismos.
- Por reacción del cloro con las paredes de la tubería y otros elementos de la red.
- Y por evaporación natural.

Una vez suministrado el cloro, éste presenta un proceso en el que se identifican diferentes etapas antes de que se lleve a cabo la desinfección. Debido a que es un agente químico muy activo, este conjunto de reacciones se clasifica según la curva de demanda del cloro, como se muestra en la Figura 3, tomada de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua (AEAAS, 1984).

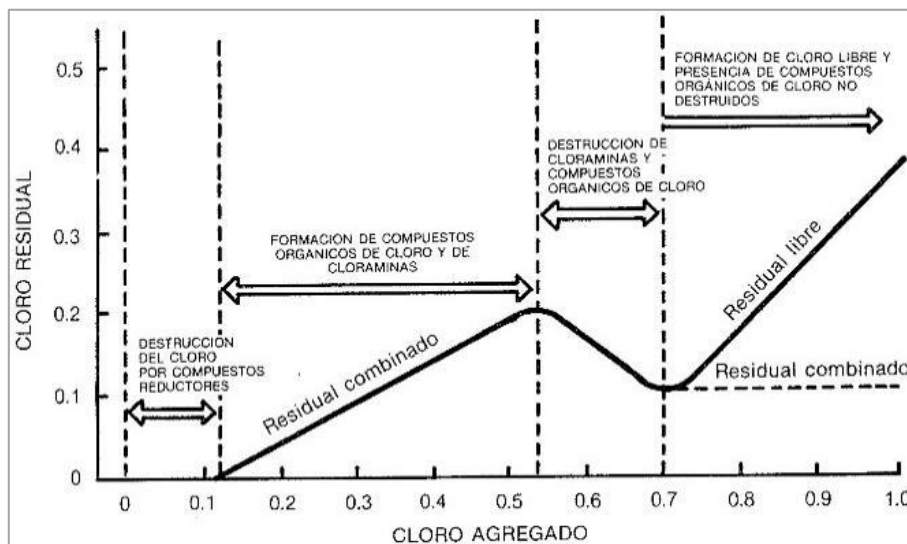


Figura 3. Curva de decaimiento de cloro (AEAAS, 1984).

Hacia la mitad de los años 70, se descubrió que además de desactivar los organismos patógenos, como se espera, el cloro reacciona con la materia orgánica presente en el agua, generando subproductos de desinfección. Específicamente compuestos orgánicos sintéticos como los trihalometanos (THM), aunque se ha identificado a otros subproductos de la desinfección, tales como los ácidos haloacéticos (AHA) (Rodríguez, 2007). Se han detectado asimismo otros subproductos de la desinfección por cloro, tales como:

- dicloroacetoniitrilo
- tricloroacetoniitrilo,

- bromocloroacetoneitrilo,
- dibromoacetoneitrilo,
- 1,1-dicloro-2 propanona,
- etc.

Sobre estos subproductos se hace menor énfasis, ya que los THM, seguidos de los ácidos haloacéticos, son los subproductos que se encuentran en mayor cantidad en el agua potable clorada (Rodríguez, 2007).

Algunos parámetros que afectan la formación de subproductos de cloración:

- La materia orgánica.
- Presencia de iones *bromuro*.
- El pH.
- La temperatura.
- La dosis de cloro.
- El tiempo de contacto.
- El tratamiento del agua.

La exposición de la población a los THM representa un riesgo de salud pública, ya que son considerados potencialmente cancerígenos para el humano (Rodríguez, 2007).

1.2.3. Métodos de aplicación del cloro.

El cloro se aplica al agua por medio de inyectores de cloro gaseoso e hipocloradores. Los inyectores de cloro gaseoso son usados por plantas de gran tamaño. El cloro gaseoso está contenido en cilindros a presión donde el cloro se encuentra prácticamente en estado líquido (Mompremier, 2015). El hipoclorador es la parte del sistema encargada de desinfectar el agua. Cuando el agua se conduce a gravedad, el hipoclorador se instala en la parte superior del tanque y cuando los sistemas operan por medio de bombeo, en la caseta de control. Los servicios urbanos y rurales de agua potable deben tener como mínimo 0.2 mg/L en los extremos de la red, que son límites establecidos en la Norma NOM SSA1 127 1994, por la Secretaría de Salud en México.

Los hipocloradores se clasifican en cuatro tipos:

- de desplazamiento positivo
- de aspiración
- de succión y
- de tabletas

En la cloración de desplazamiento positivo se inyecta hipoclorito mediante pistón o diafragma, mientras que en la cloración de aspiración, el cloro es inyectado mediante el vacío que crea el flujo del agua. En cuanto a la cloración de succión, se inyecta cloro por la succión de la bomba y finalmente en la cloración de tabletas el cloro es inyectado mediante la disolución controlada de tabletas de cloro (Mompremier, 2015).

1.3. CONCEPTOS PARA SIMULACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA.

Los avances científicos nos permiten simular el comportamiento de una red de abastecimiento de agua potable, mediante herramientas de modelado por computadora. Con ello, también nos han hecho posible simular las múltiples afectaciones que sufren las redes en cuanto a su funcionamiento y los diferentes factores que ponen en riesgo la calidad del agua (Mompremier et al., 2015).

El control de la calidad del agua y el análisis del comportamiento hidráulico de las redes han constituido durante mucho tiempo dos campos de estudio independientes en relación con el suministro de agua potable a las poblaciones. El modelado de la calidad constituye uno de los temas de mayor auge en el campo de la hidráulica urbana durante los últimos años. El objetivo de los modelos de calidad es determinar la evolución de los parámetros de calidad del agua desde la planta de tratamiento hasta la toma del consumidor, donde finalmente debería verificarse que se cumplen las normas establecidas.

Para modelar la calidad del agua en una red de distribución de agua potable, es importante tomar en cuenta tres principios fundamentales, de acuerdo a Mompremier (2015):

- Conservación de la masa en las tuberías y en los nodos; es decir la masa que entra en la tubería debe de ser igual a la que sale.
- Reacciones cinéticas del decaimiento del cloro durante su trayectoria desde los tanques de almacenamiento y a través de las tuberías.
- Mezcla completa e instantánea del agua que entra en los nodos, este principio no siempre se cumple.

El tercer principio se puede adecuar en base a la hipótesis de esta tesis en el principio de la "Variabilidad de la concentración del desinfectante en el agua posterior a un punto de mezcla en la red".

1.3.1. Mecanismos de transporte.

Dado la importancia del transporte de un fluido, se definen los mecanismos por los cuales puede ocurrir. Estos mecanismos de transporte son clasificados de la siguiente manera.

- **Convección:** Considera los cambios de concentración generados por la velocidad del flujo.
- **Difusión molecular:** Las sustancias contenidas en el agua se encuentran en constante movimiento molecular, principalmente en reposo. Como resultado de este movimiento molecular se genera un flujo del material contenido en el agua, desde los puntos de alta concentración hacia los de baja, lo que tiende a igualar la concentración dentro del volumen de agua. Este proceso de movimiento molecular se conoce como difusión.

- **Difusión turbulenta:** El flujo en las tuberías de agua potable normalmente es turbulento. La velocidad en un punto varía arbitrariamente en sentido y magnitud. En la teoría de flujo turbulento es común representar el flujo en una tubería mediante remolinos de diferente tamaño que interactúan entre sí en una sección transversal y se mueven en el sentido general del flujo. Las partículas del fluido son movidas por los remolinos de una manera similar al movimiento molecular, mezclando continuamente las sustancias contenidas en el agua y transportándolas desde las zonas de mayor a menor concentración. Este proceso se conoce como difusión turbulenta debido a su similitud con la difusión molecular. Como se verá más adelante, en las tuberías de agua potable la difusión molecular es insignificante en comparación con la difusión turbulenta y, por lo tanto, normalmente no se considera.
- **Reacción:** Cada sustancia contenida en el agua puede entrar en reacción con otras sustancias, con las paredes del tubo, con la propia agua o con microorganismos. Como resultado de diferentes procesos químicos o bioquímicos puede variar su concentración.

Los resultados experimentales comprueban el último tipo de mecanismo de transporte. Según la reacción, las sustancias en el agua se pueden dividir en tres grupos:

- **Conservativas.** No reaccionan con el agua ni con los tubos. El flúor, que a veces se introduce al agua potable por cuestiones de salud dental, pertenece a este grupo.
- **No conservativas y decrecientes.** Su concentración decrece con el tiempo de permanencia en el agua. El cloro que se usa como desinfectante pertenece a este grupo.
- **No conservativas y crecientes.** Son compuestos químicos que se forman en el agua y su concentración crece con el tiempo de permanencia. Un ejemplo son los trihalometanos que se forman por el contacto del cloro con la materia orgánica contenida en el agua.

1.3.2. Modelado de la calidad del agua

EPANET es el programa de cómputo libre más popular a nivel mundial que modela la calidad del agua en las redes de distribución, desarrollado por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) en 1993 y actualizado por última vez en 2008 (<https://www.epa.gov/water-research/epanet>). En este programa se considera que una sustancia disuelta en el agua es transportada a lo largo de una tubería con la misma velocidad media que posee el flujo y al mismo tiempo reacciona (creciendo o decreciendo según las propiedades de la sustancia) respondiendo a una velocidad de reacción. El modelo que utiliza EPANET para el transporte de sustancia no considera un transporte difusivo, ya que describe que no hay un intercambio de masa entre porciones adyacentes mientras que éstas viajan por las tuberías. Por lo que el transporte convectivo viene descrito por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + R(C_i) \quad (1)$$

Donde

- C_i = concentración (masa/volumen) en la tubería i

- x = distancia que abarca la tubería en el lapso de tiempo t
- t = tiempo
- u_i = velocidad del fluido
- R = tasa de reacción (masa/volumen/tiempo) en función de la concentración

Cabe mencionarse que los intervalos de tiempo t son relativamente cortos en comparación con los tiempos del análisis hidráulico (EPANET predefine el intervalo del tiempo (t) de una hora para la simulación hidráulica, y el intervalo de tiempo (t) de cinco minutos para la simulación de la calidad del agua), Esto con el fin de contemplar los grados de reacción que pudieran darse en pequeños tiempos de residencia dentro de la tubería.

1.3.2.1. Ecuación de difusión.

La difusión se rige por la primera ley de Fick, que establece que: el flujo de masa causado por difusión de una sustancia en un líquido, es proporcional al gradiente de la sustancia; en el caso unidimensional se tiene que:

$$\text{Flujo de masa} = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

Donde C es la concentración de la sustancia y D es el coeficiente de proporcionalidad, mejor conocido como el coeficiente de difusión. Las unidades de D son (m^2/s). El signo negativo significa que la sustancia fluye de las áreas de alta hacia las de baja concentración.

El coeficiente de difusión molecular D es proporcional a la temperatura absoluta e inversamente proporcional al peso molecular de la fase difusiva y de la viscosidad del líquido. Para la difusión de cloro en agua con una temperatura de 25°C el valor del coeficiente D es de $1.25 \times 10^{-5} \text{cm}^2\text{s}^{-1}$. El coeficiente de difusión turbulenta depende de las condiciones del flujo, en particular de la velocidad media, y puede ser calculado por la bien conocida **fórmula de Taylor**:

$$D_{turb} = 10.1V \frac{d}{2} \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (3)$$

donde:

- V - la velocidad media (m/s)
- d - el diámetro del tubo (m)
- f el factor de fricción (factor de Moody).

En el caso de tuberías de agua potable, el coeficiente de difusión molecular es mucho menor y se puede despreciar, debido a los rangos de velocidad y diámetros que se usa en redes.

1.3.2.2. El número de Schmidt.

El Número de Schmidt, es un número adimensional definido como el cociente entre la difusión de cantidad de movimiento y la difusión de masa en el fluido. Se utiliza para caracterizar flujos en los que hay procesos convectivos de cantidad de movimiento y masa. Se define como:

$$S_c = \frac{\nu}{D} \quad (4)$$

Donde:

- ν viscosidad cinemática (m²/s)
- D Difusividad de masa (m²/s)

1.3.3. Modelación del decaimiento de cloro en tuberías.

Los procesos de decaimiento de cloro tienen 2 dimensiones. El primero es la reacción de cloro en el seno de flujo. El segundo es la reacción con el material de la tubería y las sustancias adheridas a ella (Kadapia, 1998). El decaimiento en la pared de la tubería será predominante cuando se tiene un cierto estado corrosivo en las tuberías. Para el análisis de las concentraciones presentes en los nodos en el tiempo (t) de la simulación, a su vez, se utilizan las fórmulas de las propiedades del flujo, como número de Reynolds, velocidad, etc. Sin embargo, la principal condicionante del cálculo de las concentraciones del cloro depende de dos coeficientes, el coeficiente de reacción en el flujo (k_b) y el coeficiente de reacción en la pared de la tubería, (k_w).

1.3.3.1. Coeficiente de reacción del cloro en el seno del flujo k_b .

Dentro de la masa del fluido se producen reacciones químicas, que están en función de la concentración del producto adicionado, de la tasa de reacción y del número de orden de la reacción:

$$\frac{dC}{dt} = \pm k_b C^n \quad (\text{al tratarse de primer orden}) \rightarrow \frac{dC}{dt} = \pm k_b C \quad (5)$$

Donde:

- $\frac{dC}{dt}$ = Variación de concentración ocurrida en el lapso de tiempo dt
- C = Magnitud de la concentración (mg/L)

Resolviendo:

$$\frac{dC}{C} = \pm k_b dt$$

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \pm k_b \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{C}{C_0} = \pm k_b \cdot t$$

Finalmente, despejando C :

$$C(t) = C_0 \cdot e^{\pm k_b \cdot t} \quad (6)$$

Donde:

- C_0 = Concentración inicial de la simulación (mg/L)
- $C(t)$ = Concentración en el tiempo t (mg/L)
- k_b = Coeficiente de reacción en el seno de flujo (adimensional)
- t = Intervalo de tiempo (días)

El coeficiente de reacción en el seno del flujo puede estimarse de la siguiente manera: Se colocan distintas muestras de agua de concentración inicial C_0 conocida en recipientes de vidrio inertes al cloro. Midiendo en diferentes intervalos de tiempo la concentración C_t , se puede graficar el logaritmo natural de C_t/C_0 en función del tiempo. Si se trata de una reacción de primer orden, se obtendrá una recta cuya pendiente es k_b .

1.3.3.2. Coeficiente de reacción de cloro en la pared de la tubería k_w .

El cloro y otras sustancias contenidas en el agua pueden reaccionar con los materiales de la pared de la tubería. La velocidad de las reacciones de calidad del agua que ocurren en o cerca de la pared de la tubería puede ser considerada dependiente de la concentración en el flujo a granel mediante el uso de una expresión de la forma:

$$R = \left(\frac{A}{V}\right) k_w C^n \quad (7)$$

Donde el factor (A/V) es el área superficial por unidad de volumen dentro de un tubo (igual a 4 dividido entre el diámetro de la tubería). Las dimensiones de k_w pueden ser unidades de masa/área/tiempo (1/d) o longitud/tiempo (m/d) debido a su uso en diferentes modelos que varían entre estos dos tipos de dimensiones. En EPANET se pueden trabajar con los dos, especificando el orden de magnitud de cada uno. Esto es, el orden para el uso de k_w en unidades (1/d) es de orden 0, y el orden para unidades (m/d) es 1.

La determinación de k_w es más complicada que la de k_b , debido a que k_w depende de la temperatura y de las características de la tubería, especialmente del material y la antigüedad de la misma. En las tuberías metálicas la rugosidad aumenta con su antigüedad, y relacionado a incrustaciones y a los efectos de los agentes corrosivos.

1.3.3.3. Valores típicos de k_b y k_w .

La siguiente Tabla 3 resume los valores típicos para los coeficientes k_b y k_w (Powell et al., 2000; Hallam et al., 2002; Boccelli et al., 2003; Phillip, 2003; Al-Jasser, 2007).

Tabla 3. Rango de valores para k_b y k_w consultados en la bibliografía.

<i>Tipo de reacción</i>	<i>Valores mínimos</i>	<i>Valores máximos</i>
Reacción del cloro en el seno del agua, algunos compuestos y microorganismos (k_b)	0.09 – 0.12 d ⁻¹	1.38 – 1.52 d ⁻¹
Por reacción de cloro en la pared de la tubería (k_w)	0.03 – 0.04 m/d	1.34 – 1.52 m/d

1.4. TÉCNICA DE ESTÍMULO RESPUESTA PARA LA OBTENCIÓN DE CURVAS DE DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA.

Estas técnicas son comúnmente empleadas para validar los modelos de simulación de reactores electroquímicos (Rosales et al, 2015; Cunill, Iborra & Tejero, 2010) mediante las curvas de distribución de tiempos de residencia (DTR). El nombre se deriva porque la técnica realiza un estímulo, es decir, se perturba el sistema a la entrada y se observa la respuesta de la perturbación a la salida, la cual es en función del modo de fluir a través del recipiente (en este caso será a través del crucero donde se realizará la mezcla).

El estímulo es la introducción (o inyección) del trazador en el flujo de entrada, mientras que la respuesta es la representación de la concentración de trazador en el flujo de salida en función del tiempo. El trazador es una sustancia fácilmente identificable y medible (compuestos radiactivos, colorantes, soluciones eléctricamente conductoras, etc.), la cual no debe perturbar el curso del flujo (por lo que debe tener las mismas propiedades físicas que el fluido a tratar) y no debe perderse en el recipiente, es decir, no debe reaccionar, ni adsorberse, ni abandonar la fase estudiada.

Tipos de estímulos (entradas) que pueden utilizarse:

- a) Pulso
- b) Escalonado
- c) Periódico
- d) Al azar, conocido

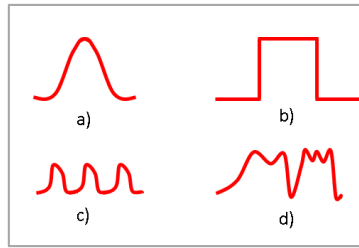


Figura 4. Tipos de estímulos para inyección de trazador.

CAPÍTULO 2

2. MEZCLA EN CRUCEROS

Los motores principales de un modelo de una red de tuberías son dos: simulación hidráulica y calidad del agua. Los modelos de simulación hidráulica satisfacen las necesidades de diseño de la red a través de años de funcionamiento, aplicación y validación, mientras que los modelos de calidad del agua todavía tienen que demostrar su rendimiento, especialmente en las redes altamente interconectadas (Romero et al. 2008). La incapacidad de predecir la calidad del agua de forma precisa en los sistemas de distribución de agua puede conducir potencialmente al diseño erróneo de los sistemas de monitoreo y una ubicación inexacta de sistemas de re-cloración necesarios para el control de desinfección (Song et al., 2009). Estos modelos también son necesarios para simular la dispersión espacio-temporal de los agentes químicos y microbianos durante acontecimientos accidentales o intencionales de contaminación.

Perfeccionar la modelación de la mezcla de soluto en las uniones de tuberías tendrá un impacto en una amplia variedad de análisis de redes, incluida la predicción de los residuos de desinfectantes, ubicaciones óptimas para sensores de calidad del agua, modelos de predicción para los sistemas de alerta temprana, y una evaluación cuantitativa de algún riesgo posible de descontrol de desinfectantes. Por lo tanto, el modelado preciso de la calidad del agua se ha convertido en un tema cada vez más importante en la gestión de los sistemas de distribución de agua (Mompremier, 2015).

2.1. MODELO DE MEZCLA COMPLETA E INSTANTÁNEA

En algunos nodos se concentra el caudal de dos o más tuberías, se asume que la mezcla del fluido es completa e instantánea (Rossman, 2000; Alcocer 2000). Por lo anterior, la concentración de la sustancia que abandona el nodo de mezcla, será la media ponderada de las concentraciones de las tuberías que conectan al cruce. Para un nodo k dado, se tiene:

$$C_{i|x=0} = \frac{\sum_{j \in I_k} Q_j C_{j|x=L_j} + Q_{k,ext} C_{k,ext}}{\sum_{j \in I_k} Q_j + Q_{k,ext}} \quad (8)$$

Donde:

- i , tramo con caudal que abandona el nodo k ;
- I_k , conjunto de tramos con caudal que llega al nodo k ;
- L_j , longitud del tramo j , (m);
- Q_j , caudal en el tramo j , (m^3/s);
- $Q_{k,ext}$, caudal externo que entra a la red en el nodo k ;
- $C_{k,ext}$, concentración del caudal externo que entra en el nodo k .

En este modelo de mezcla, las concentraciones $C_{j|x=L_j}$, son el resultado del algoritmo de Transporte Lagrangiano, también utilizado en EPANET.

2.2. ALGORITMO DE TRANSPORTE LAGRANGIANO

Los intervalos de tiempo para ejecutar la simulación de calidad del agua en EPANET son menores en comparación con los de flujo del agua (por lo general son minutos, en lugar de horas). Esto es con el fin de estimar de una mejor manera los efectos de reacción que se puedan dar a lo largo de una tubería en tiempos de viaje reducidos que pudieran llegar a darse. Entonces, debido a estos intervalos de tiempo, la tubería se divide en segmentos discretos en los cuales se calcula para cada uno la concentración conforme van fluyendo a través de la línea.

A medida que avanza el tiempo, el primer segmento aguas arriba de una línea incrementa su tamaño para alojar el agua que va entrando en la misma. Al mismo tiempo, el último segmento de la línea pierde volumen debido al agua que abandona la línea, reduciéndose en su tamaño equivalente. En cuando a los segmentos intermedios, su tamaño permanece constante.

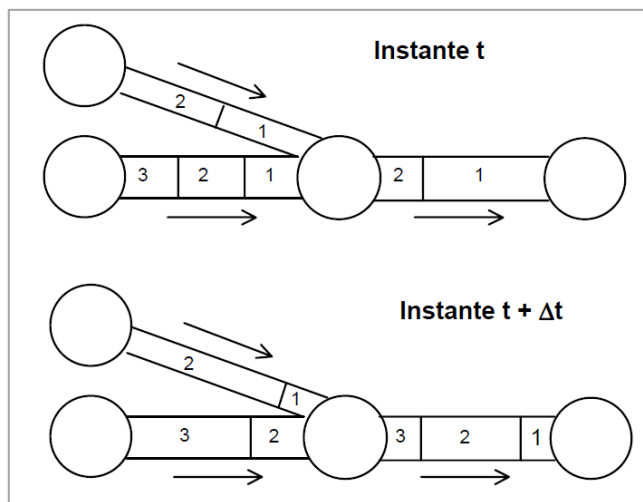


Figura 5. Evolución del paso de los segmentos de tubería en el método de transporte Lagrangiano, Rossman (2000).

Para tomar las concentraciones de entrada, se toman las concentraciones en los extremos de las tuberías que conectan al crucero (cuya longitud es L_j). Recordando que la simulación de calidad del agua se hace en un intervalo de tiempo pequeño Δt , en el modelo antes mencionado se divide el flujo de la tubería en segmentos más cortos en función de este intervalo (por defecto en Epanet, Δt equivale a 5 minutos). Entonces, las concentraciones que se toman de entrada corresponden a aquellas calculadas en los segmentos que están más próximos al crucero.

2.3. ESTADO DEL ARTE DEL MODELADO DE MEZCLA COMPLETA E INSTANTÁNEA.

Varios investigadores han puesto especial énfasis en un fenómeno muy importante dentro de los sistemas de distribución de agua potable: "Mezclas en cruces de tuberías". Aquí se presenta una recopilación de diversos autores que buscan demostrar que la simulación de la mezcla en cruceros de manera homogénea. Ellos describen situaciones erróneas en el análisis de calidad del agua al referirse a la simulación con mezcla completa.

En un estudio hecho por Fuentes et al. (2002), se utilizaron tuberías de acrílico de diferentes diámetros, así como diversos accesorios como: Tees, codos, adaptadores, reducciones para realizar los diferentes montajes y ensambles de una red de pruebas la cual tenía cruceros. De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, puede decirse que la concentración de una sustancia en un nudo no siempre se realiza de manera homogénea. Esto se corroboró cuando se aumentó el flujo en una de las entradas, de igual manera se incrementó el flujo en las salidas, y se observó una disminución de la concentración en las dos salidas, pero nunca coincidió en ser de manera homogénea.

Austin et al. (2007) estudiaron el fenómeno de mezcla en las uniones de cruz con velocidades de flujo de 7.6 L / min o superior y una amplia gama de números de Reynolds en el régimen turbulento. Se eligieron dos convenciones para presentar el nivel de mezcla: concentración adimensional y "mass split". Los resultados indicaron que la concentración media adimensional y "mass split" a través de las salidas fueron 85% y 15%, respectivamente. Estos resultados indican que la mezcla en la salida de la unión era incompleta a gran diferencia de la mezcla perfecta, en donde se esperaba un 50% (mezcla homogénea).

Algunos autores presentan esquemas en sus diferentes escenarios visualizando la diferencia existente entre el experimento físico y el modelado mediante CFD. Por ejemplo, van Bloemen Wanders et al., (2005) inicialmente buscaba interpretar mediante "mezcla completa" sus escenarios, sin embargo en muy pocos ensayos resultaba homogéneo. Los resultados destacan una diferencia significativa, haciendo mostrar un menor error entre los demás métodos contra "mezcla completa".

Cruickshank (2002), publicó un artículo donde concluye que dos flujos se mezclan en forma parcial. Su principal enfoque se basó en examinar los casos en donde se asigna un gasto superior de una de las entradas. También describe que las pérdidas locales juegan un papel importante en el fenómeno de mezcla, pues la forma en que se produce la repartición de los flujos en el cruce tiene una ligera diferencia cuando la geometría interna parte al flujo para distribuirse a dos salidas (aunque su trabajo implicaba presiones de 0.12 bar). También mencionó

que la turbulencia es un factor importante en el fenómeno de mezcla. Con los resultados obtenidos se plantearon las siguientes ecuaciones:

$$C_{s1} = \frac{1}{S_1} [E_2 C_{e2} + DQ C_{e1} + 0.06(C_{e1} - C_{e2})]$$

$$C_{s2} = \frac{1}{S_2} [S_2 C_{e1} - 0.006 E_2 (C_{e1} - C_{e2})]$$

Donde:

- E_1, E_2 = Gastos de entrada (l/s)
- S_1, S_2 = Gastos de salida (l/s)
- C_{e1}, C_{e2} = Concentración de la sustancia trazadora en las entradas (mg/L)
- S_{e1}, S_{e2} = Concentración de la sustancia trazadora en las salidas (mg/L)
- DQ = Parte del caudal que fluye sin mezclarse, cuando uno de los flujos es mayor a otro.

Para calcular DQ , se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$S_1 = E_1 - DQ$$

$$S_2 = E_2 + DQ$$

Finalmente, los resultados obtenidos fueron utilizados para calcular las concentraciones en una red de agua potable. Después de haber realizado varias pruebas en diferentes escenarios, se concluyó que la hipótesis de mezcla completa de los flujos en cruces de redes de tuberías lleva a cálculos errados sobre concentración de sustancias en el agua.

Ho et al. (2007) investigaron varias configuraciones de unión tales como cruz y dobles uniones en T. Los resultados mostraron que la mezcla en uniones de cruz y tee es incompleta y depende de las velocidades de flujo entre las entrantes y salientes de la unión. A raíz de ese estudio, se generó un nuevo modelo llamado **Bulk Advective Mixing (BAM)** que se implementó en EPANET y puede simular una mezcla incompleta en uniones de cruz.

Mompremier y Fuentes Mariles (2012) también estudiaron los efectos de mezcla similares en uniones de tuberías. Se utilizan dos flujos entrantes adyacentes (uno con NaCl como trazador y el otro con agua de la llave) que tienen los mismos números de Reynolds en régimen turbulento ($Re > 10.000$) para las secciones de entrada y salida. Se observó que la concentración de NaCl en las dos secciones de flujo de salida era diferente, con más de 85% de diferencia. Mompremier (2015) construyó un dispositivo físico con el fin de dar seguimiento a la investigación de la mezcla en cruceros. En el Laboratorio del edificio 11 del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, se instaló un modelo de red que cuenta con las siguientes características.

El dispositivo estuvo compuesto de tres partes fundamentales:

Tabla 4. Diámetros de tuberías para cruceros en los experimentos de Mompremier (2015)

Diámetro Nominal		Diámetro Real	
[pulg]	[mm]	[mm]	[pulg]

1/2"	13	17.54	0.69
3/4"	19	22.08	0.87
1"	25	29.80	1.17
1 1/4"	32	38.06	1.50
1 1/2"	38	43.84	1.73

Los cruceros fueron construidos con tuberías de policloruro de vinilo, PVC, de cinco diámetros diferentes, como se muestra en la tabla 4. Se utilizó como fuente de abastecimiento un cárcamo de 2.12 metros cúbicos, empleando la toma de la red de la Universidad para llenar el cárcamo. A 3.55 metros del nivel del dispositivo se instalaron dos tinacos (Figura 6) de una capacidad de 420 litros cada uno, con el fin abastecer el dispositivo durante las pruebas. La conducción del agua se realiza por medio de tuberías PVC de 2 pulgadas de diámetro, tanto para la impulsión hacia los tinacos para el abasto del modelo y el rebose de excedentes. Finalmente, para realizar los diferentes montajes y ensambles, así como la conexión de válvulas, fue necesario contar con accesorios de acople rápido en el mismo material de la tubería. Los accesorios adquiridos fueron: "Tees" rápidas, codos rápidos, collares sencillos, adaptadores macho y hembra rápidos, reducciones rápidas y uniones rápidas.

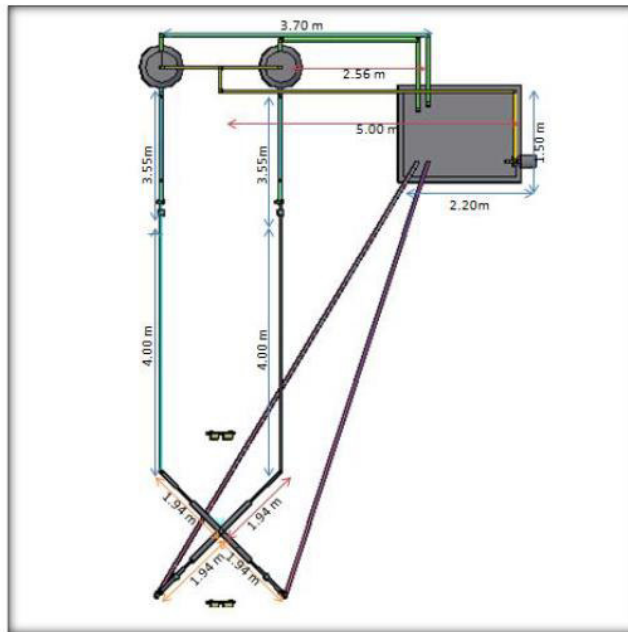


Figura 6. Modelo experimental de la mezcla en cruces de tuberías.

Se utilizaron cuatro medidores de flujo ubicados en las entradas y salidas de los cruces de tuberías. El equipo mide e indica caudal instantáneo, está construido con un tubo de medición metálico cuya medición es confiable para bajos caudales, y apto para altas presiones. Se utilizaron cuatro medidores de cloro diseñados por la empresa italiana *B&C electronics*, los cuales logran una adecuada medición de la concentración del cloro de forma instantánea y con gran precisión.

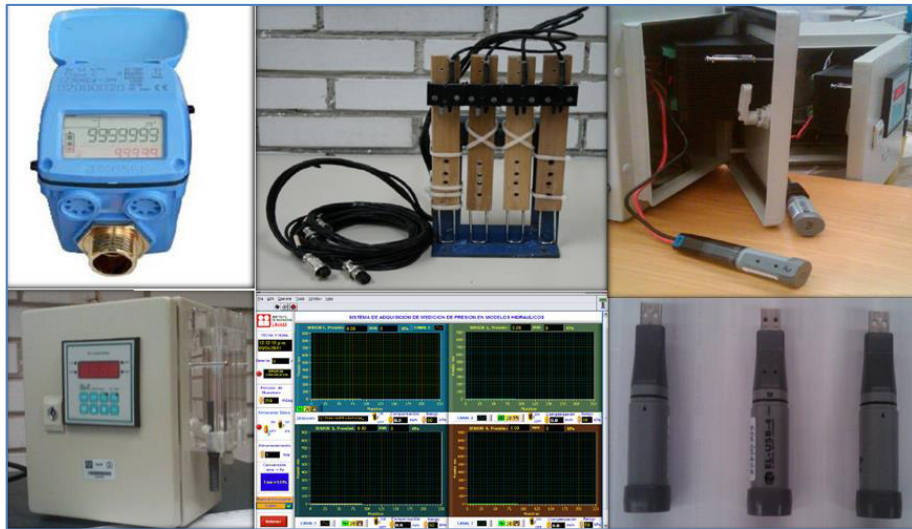


Figura 7. Instrumentación para el desarrollo del experimento, Mompremier (2015)

Un experimento por investigadores de la Universidad de Tucson en colaboración con la Universidad de Korea (Song et al., 2009) fue basado en un modelo de tuberías de laboratorio para demostrar las diferencias entre un cálculo con mezcla completa y mezcla incompleta. Para el modelo manejaron 2 tanques, de los cuales, sólo uno contenía concentración de NaCl como trazador y el otro únicamente agua de la llave. Utilizan 2 bombas para realizar la circulación de los flujos. La red consta de 26 uniones de tubería, de las cuales son 13 tees, 3 codos, 1 bifurcación y 9 uniones de cruz.

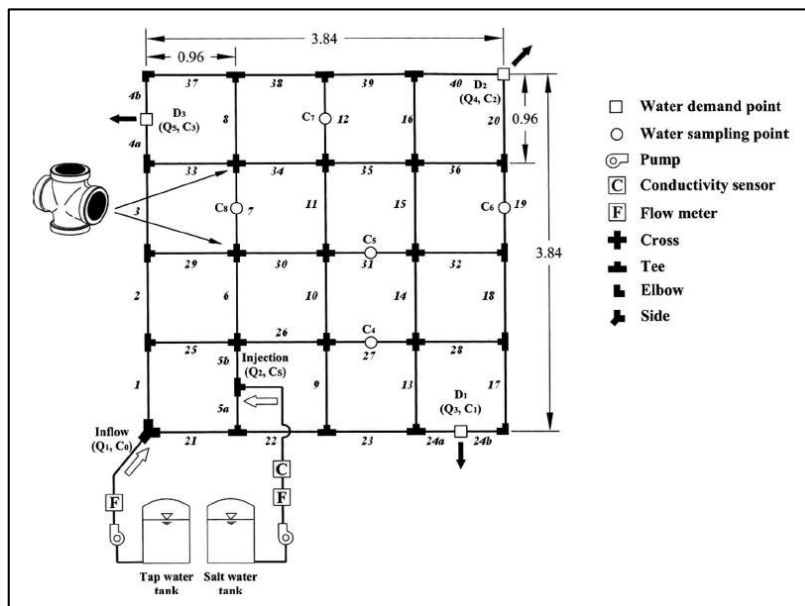


Figura 8. Dispositivo experimental se Song et al., (2010).

Aunque su modelo utiliza diámetros y longitudes pequeños de tubería, se ajustan a lo aproximado a lo real, mediante análisis dimensional, analizando gastos con régimen transitorio y turbulento ($5,040 > Re > 20,520$). Se realizaron también simulaciones hidráulicas tanto en EPANET como en CFD (aunque mencionan que si llegan a comprobar los resultados en físico, no muestran resultados del CFD) para la comparativa en cuanto a su análisis de mezcla.

La comparativa entre los resultados realizados con EPANET (mezcla completa) y el análisis físico (mezcla incompleta) demuestran que se tiene una diferencia significativa entre ambas partes. Realizando una prueba ANOVA se compararon los resultados dando una significativa diferencia entre un análisis realizado con "mezcla completa e instantánea" que la "mezcla incompleta". La primera realiza una distribución más uniforme del concentrado a lo largo de la red, haciendo especular que el cloro se mantiene equivalente en la mayoría de los puntos. Sin embargo, en la siguiente figura se muestra que con el modelo de "mezcla incompleta" se tiene una pluma "diagonal" de concentrado, por lo que en ciertas zonas de concentra en mayor cantidad el soluto que en otras, mientras que el modelo de mezcla completa distribuye el soluto de una manera homogénea en la red experimental.

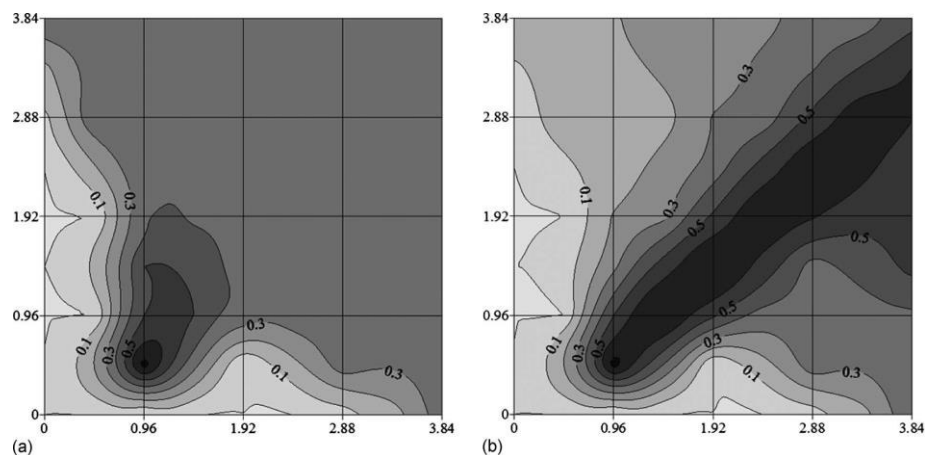


Figura 9. Isolineas de contorno de dispersión de soluto en una red experimental. A) Resultados de simulación basados en Mezcla Completa; b) Resultados basados en Mezcla Incompleta. Experimento realizado por Song et al., 2009.

Se presenta una tabla descriptiva de los parámetros utilizados por los autores para la realización de sus experimentos, en la que se muestran las dimensiones de las tuberías en las que se realizan las pruebas, así como de las variables simuladas. Aún cuando se han representado diámetros de tuberías de 100mm o mayores, en estos modelos, la velocidad del flujo no superó 0.77m/s, con lo cual el número de Reynolds simulado en los modelos con los diámetros mayores a 100mm, alcanzaron valores como máximo de 1.8×10^5 . Aún con todo ello, los diámetros y materiales utilizados en los trabajos lograban tratar los caudales en las tuberías para que fluyeran a presión y aunque se lograban casos en régimen turbulento, los valores trabajados del número de Reynolds no rebasaban por mucho a 4000 para sus dispositivos experimentales. Aunque algunos trabajaron con grandes valores de Reynolds únicamente en CFD, no existía una validación suficiente que respaldara las simulaciones. En este aspecto es donde se ha trabajado en el modelo experimental presentado en esta tesis, donde los rangos de velocidad para tuberías de 100mm, alcanzan valores mayores a los presentados hasta ahora de manera física.

Tabla 5. Relación de parámetros utilizados para la realización de sus experimentos.

EXP.	No. TANQUES	LONGITUD (m)		DIÁMETRO [mm]		VELOCIDAD [m/s]		GASTO [l/s]		Re		CONCENTRACIÓN		TRAZADOR/ CLORO	¿EXP REAL?	AUTORES
		Lmín	Lmáx	Dmín	Dmáx	Vmín	Vmáx	Qmín	Qmáx	Mín	Máx	Cmín	Cmáx			
1	2	264	526.5	76.2	152.4	0.014	0.027	0.123	0.255	1700		100 mg/L		TRA	No	Andrade et al., 2010
2	2	0.96		16		0.143	1.63	0.029	0.328	2295	26147	524 mg/L	573 mg/L	TRA	Si	Song et al., 2009
3	2	45.72		203.2		0.095	0.119	3.091	3.850	19304	24157	1000 mg/L		TRA	No	Ho & Khalsa 2008
4	2	0.91		12.7		0.245	0.300	0.031	0.038	3111.5	3810	1 [norm]		TRA	Si	Ho et al., 2007
5	2	0.508	1.016	25.4	50.8	0.157	0.450	0.079	0.228	4000	13000	1 [norm]		TRA	Si	Ho & Rear 2009
6	No	1	1	40	40	3.000	6.000	3.770	7.540	12000	24000	1 [norm]		TRA	No	Liu et al., 2011
7	No	0.825	3.302	12.7	50.8	0.866	1.730	0.110	3.506	11000	88000	1[norm]		TRA	No	Romero et al., 2008
8	2	152.4		305		0.028	0.071	2.046	5.260	8561	12698	100 mg/L		TRA	Si	Romero et al., 2008
9	2	1.016	2.032	25.4		0.612	3.493	0.310	1.770	5044.8	8722.2	176.4 mg/L	183.5 mg/L	TRA	Si	Shao et al., 2014
10	No	ND		25.4		0.059	1.575	0.030	0.798	1500	40000	1 [norm]		TRA	No	Webb 2007
11	No	ND		50.8		0.787		1.595		40000		1 [norm]		TRA	No	Webb & van bloemen 2006
12	No	1.838		50.8		0.780		1.581		44387.8		1 [norm]		TRA	No	Van Bloemen et al., 2005
12	2	1.838		50.8		0.868		1.759		44111		1 [norm]		TRA	Si	
13	2	0.91	1.9	25.4		1.066	1.421	0.54	0.720	27076.4	36093.4	0.04 mg/L	0.56 mg/L	Cl	Si	Mompremier 2012
14	2	1.87		25	35	1.421	1.590	0.720	1.530	36093.4	55650	0.04 mg/L	0.56 mg/L	Cl	Si	Mompremier 2012
15	2	1.94		17.54	43.84	0.270	0.550	0.105	0.21	6050	12100	0.75 mg/L	1.75 mg/L	Cl	Si	Mompremier 2015
16	No	2		100	140	0.584	0.764	6.000	9.000	76400	81760	TERMAL		TRA	No	Kang et al., 2010
17	No	ND		50	150	0.500	3.000	0.982	8.830	ND	ND	TERMAL		TRA	Si	Ogawa et al., 2005
18	No	0.2	0.8	51		0.470	0.480	0.960	0.981	20315	20745	TERMAL		TRA	No	Séverac et al., 2013
19	No	10	20	250		0.240	0.720	11.78	35.343	60000	180000	1 [norm]		TRA	Si	Yu et al., 2014
20	2	ND		19.05		0.375	6.430	0.107	1.833	7143.75	122491	1 [norm]		TRA	Si	Romero et al., 2006
21	ND	304.8		305		ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.25 mg/L		TRA	Si	Choi et al 2008
22	2	1.94		12.7	38	0.794	1.342	0.17	0.9	17043.4	30172	0.29 mg/L	0.85 mg/L	Cl	Si	Mompremier et al., 2015

CAPÍTULO 3

3. SIMULACIÓN HIDRÁULICA Y DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Hoy en día, es una gran ventaja contar con modelos numéricos que permitan conocer el desarrollo del funcionamiento de una red de agua potable. Esto es logrado mediante el cálculo de variables significativas (presiones en los nodos, velocidades, caudales, entre otras) y con ello, se alcanza el control del sistema de agua, además de facilitar la toma de decisiones en cuanto a su operación y modificaciones.

Generalmente, los sistemas de distribución de agua potable son obras de ingeniería de gran escala. Por tanto, es necesario considerar una gran cantidad de información para realizar una adecuada simulación hidráulica (CONAGUA, 2016).

Los modelos empleados para una red en general, contemplan la solución de valores discretos, soluciones en ciertos puntos o zonas donde se obtiene valores numéricos. Sin embargo, existen fenómenos a menor escala que ocurren en puntos específicos de la red que necesitan un estudio más riguroso para su comprensión. Un ejemplo es la mezcla de soluto en uniones de cruz. En este proceso intervienen las propiedades del soluto y su convección en el fluido, además de las condiciones de velocidad y turbulencia descritas por los caudales de entrada en estas uniones.

En el pasado únicamente se consideraba el análisis hidráulico con el objetivo de obtener las velocidades o los gastos en los tramos y las presiones en los nodos. Desde los 90, con el surgimiento de los modelos de simulación de calidad del agua, que calculan, entre otras, la evolución de un soluto (como el cloro residual dentro de las tuberías), los modelos de simulación han evolucionado hacia una nueva etapa en el avance de este conocimiento (CONAGUA, 2016).

3.1. SIMULACIÓN HIDRÁULICA

La simulación hidráulica es el empleo de un modelo numérico codificado en computadora para simular el funcionamiento hidráulico de un sistema de distribución de agua potable. Algunos derivados de su principal aplicación son el definir las características del sistema para cumplir con criterios preestablecidos de diseño en lo referente a gastos y presiones disponibles (CNA, 2007; Jiménez 2007). El modelo matemático de la red de distribución consistirá en un conjunto de líneas y nudos que representan a las tuberías, las bombas y estaciones de bombeo, las válvulas reguladoras y automáticas, los depósitos y embalses, y los puntos de consumo o inyección que forman la red.

3.1.1. Ecuaciones fundamentales.

3.1.1.1. Ecuación de continuidad

La ecuación establece que un fluido al pasar por un conducto, mantiene el mismo caudal de entrada, que de salida (Ecuación 9)

$$Q_1 = Q_2 \quad (9)$$

Donde Q es el gasto que pasa por el conducto (m³/s).

El concepto de gasto o caudal como la cantidad de materia o masa que atraviesa un lugar en cierta unidad de tiempo (Rodríguez, 2007). En el caso de los líquidos, los cuales se consideran prácticamente incompresibles, la cantidad de materia se puede indicar como el volumen. Entonces, el gasto se define como el volumen que pasa por un punto en el espacio, en un determinado tiempo (Ecuación 10 izquierda). Esta relación dependiente del tiempo se puede reescribir en la ecuación 10 (derecha), describiendo la cantidad de flujo que atraviesa el área transversal de la tubería por unidad de tiempo.

$$Q = \frac{V}{t} \quad \leftrightarrow \quad Q = A \cdot v \quad (10)$$

Donde:

- A = Área transversal del conducto (m²)
- Q = Gasto (m³/s)
- v = Velocidad del flujo (m/s)

Por lo que (9) puede expresarse de la siguiente manera:

$$Q_1 = A_1 v_1 = A_2 v_2 = Q_2$$

3.1.1.2. Ecuación de la Energía

Esta ecuación es para conocer el comportamiento de un sistema de abastecimiento de agua para flujo permanente. La expresión describe la energía específica de un fluido de densidad (ρ) y se representa como energía por unidad de peso en metros columna de fluido (mcf) (Jiménez, 2004).

Suponiendo que el fluido es incompresible, entonces la energía específica puede expresarse como:

$$H_t = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad (11)$$

Donde:

$z \rightarrow$ denominada *carga de posición*, es la cota geométrica del fluido. Representa la energía potencial por el hecho de tener cierta elevación sobre el nivel de referencia en que se está trabajando.

$\frac{P}{\gamma} \rightarrow$ Se denomina *carga de presión*, es la energía que ha adquirido el fluido por estar sometido a una determinada presión. A la suma de la altura de presión y a la cota geométrica z , se le conoce como altura piezométrica.

$\frac{v^2}{2g} \rightarrow$ Llamada *carga de velocidad*, corresponde a la energía específica del fluido cuando está en movimiento.

La ecuación puede describir la distribución de energía existente entre dos puntos del transcurso del fluido (Figura 10).

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{f_{1-2}} \quad (12)$$

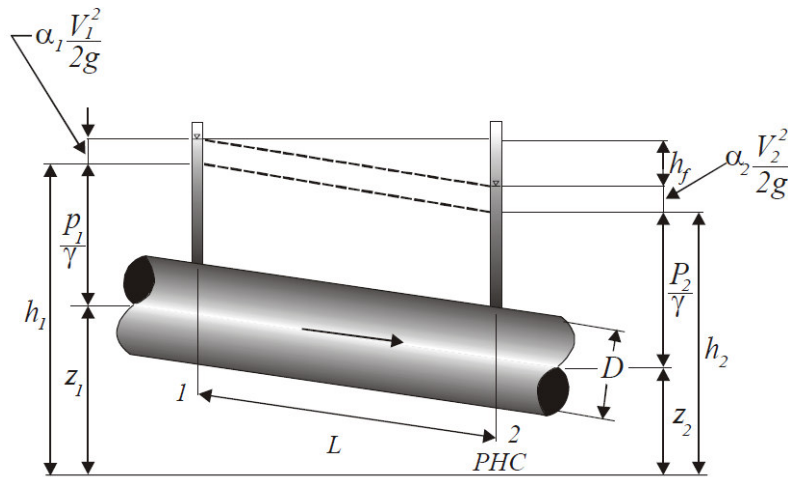


Figura 10. Planteamiento de la ecuación de energía entre 2 puntos.

El término hf_{1-2} corresponde a las pérdidas hidráulicas debidas a la fricción entre el líquido y el conducto. Dichas pérdidas se describirán a continuación.

3.1.2. Concepto de disipación de la energía del flujo

En la mecánica de fluidos, existen resistencias que se generan por la acción de la viscosidad del líquido, por características del conducto por el cual fluyen y por accesorios y dispositivos presentes en la red (Méndez, 1995). Existen dos tipos de pérdidas de energía, las pérdidas por fricción y las pérdidas locales.

3.1.2.1. Pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción (o también nombradas pérdidas primarias) ocurren con el roce entre el líquido y las paredes de la tubería, además de los efectos viscosos del líquido. Se puede estimar mediante la Ecuación de Darcy-Weisbach, establecida entre los años 1845-1875 (Sotelo, 1991; Jiménez, 1994):

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

Donde:

- h_f = Pérdidas por fricción (mca)
- L = Longitud del tramo de tubería (m)
- D = Diámetro de la tubería (m)
- v = Velocidad media del flujo (m/s)
- g = Aceleración de la gravedad ($\approx 9.81 \text{ m/s}^2$)
- f = Factor de fricción (adimensional)

El factor de fricción f está en función de la rugosidad *relativa* de la tubería y del *número de Reynolds*.

$$f = g(\epsilon/D, Re)$$

La rugosidad relativa (ϵ/D) está en función del diámetro interior del tubo y de la rugosidad absoluta (ϵ), que puede expresarse como la altura media de las asperezas (*rugosidad absoluta*), como un promedio obtenido del resultado de un cálculo con las características del flujo, mas no propiamente por el obtenido como la media de las alturas determinadas físicamente de la pared de cada conducción (Sotelo, 1991).

El número de Reynolds, fue propuesto por Osborne Reynolds, en 1883. En base a sus experimentos, proponer un criterio para diferenciar el flujo de un líquido entre laminar y turbulento, el cual se hace mediante un número adimensional que lleva su mismo nombre:

$$Re = \frac{vD}{\vartheta} \quad (14)$$

Donde:

- Re = Número de Reynolds (adimensional)
- v = Velocidad media del flujo (m/s)
- D = Diámetro del tubo (m)
- ϑ = Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

El *número de Reynolds*, permite evaluar la preponderancia de las fuerzas viscosas sobre las de inercia (Sotelo, 1991).

Poiseuille, en 1846, fue el primero en determinar matemáticamente el factor de fricción en flujo laminar y obtuvo una ecuación para determinar dicho factor:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (15)$$

Para un flujo en transición laminar-turbulento, Colebrook y White, presentaron la siguiente fórmula empírica para el cálculo del f :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (16)$$

Es una de las ecuaciones más empleadas para el cálculo del factor de fricción en tuberías, sin embargo, requiere de iteraciones para encontrar dicho valor, ya que ésta variable se encuentra implícita dentro de la fórmula. La gráfica de esta expresión se puede describir mediante el diagrama de Moody (Figura 11).

Diagrama de Moody

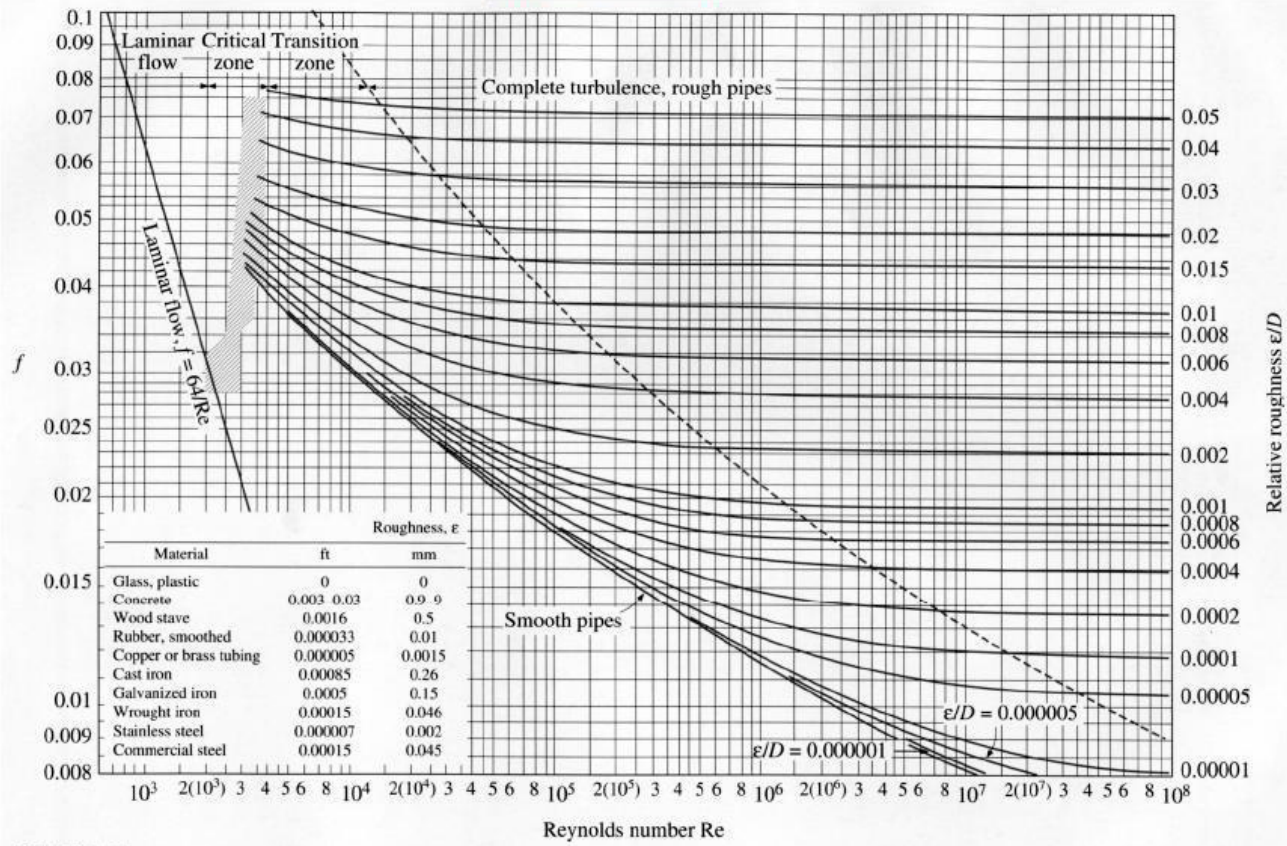


Figura 11. Diagrama de Moody.

No obstante, existen fórmulas alternativas con las cuales puede obtenerse el factor de fricción de forma explícita, sin necesidad de iteraciones; la más popular de ellas es la de Swamee y Jain (1976):

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon}{3.71D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (17)$$

Válida para $10^{-6} < \epsilon_r < 10^{-2}$ y $10^3 < Re < 10^8$, con un error relativo de $\pm 1\%$ (Jimenez, 2004).

Otra manera de calcular las pérdidas por fricción en tuberías, fue propuesta por Hazen-Williams. Es una de las ecuaciones empíricas más utilizadas para evaluar dicha pérdida de energía, tal vez por la cantidad de información de tipo experimental que se ha reunido en su publicación en 1902. Su expresión en unidades métricas es (Méndez, 1995):

$$h_f = 10.67 \left(\frac{Q}{C_H} \right)^{1.862} \frac{L}{D^{4.87}} \quad (18)$$

Donde:

- h_f = Pérdidas de carga por fricción. (m)
- Q = Gasto del flujo (m^3/s)
- C_H = Coeficiente de fricción de Hazen-Williams (adimensional)
- L = Longitud de la tubería (m)
- D = Diámetro de la tubería (m)

Finalmente, hay una tercera expresión para calcular la pérdida de energía por fricción, de Manning Strickler Gaukler, más comúnmente conocida como fórmula de Manning (1890), para el cálculo de pérdidas primarias por fricción se expresa como:

$$h_f = 10.29n^2 \frac{Q^2}{D^{16/3}} L \quad (19)$$

Donde:

- n = Factor de rugosidad de Manning.
- Q = Gasto del fluido (m^3/s)
- D = Diámetro de la tubería (m)
- L = Longitud de la tubería (m)

3.1.2.2. Pérdidas locales

Estas pérdidas también son conocidas como pérdidas secundarias. Ocurren debido al cambio de dirección u obstrucción parcial del flujo del líquido a causa de los accesorios existentes en la red, estas pérdidas son diferentes a las pérdidas por fricción en tuberías (Sotelo, 1991).

La fórmula general para encontrar las pérdidas secundarias se expresa como:

$$h = K \frac{v^2}{2g} \quad (20)$$

Donde:

- h = Pérdida de energía secundaria (mca)
- K = Coeficiente adimensional que depende del tipo de accesorio que se trate.
- $v^2/2g$ = Carga de velocidad, aguas abajo (m)

Las pérdidas locales se pueden clasificar en función del tipo de accesorio (Sotelo, 1991) (Figura 12):

- **Pérdidas de entrada:** ocurren cuando el líquido, para su conducción inicial, pasa a contraerse por la entrada el tubo, provocando la formación de zonas de separación.
- **Pérdida por rejilla:** Con el uso de rejillas para impedir el paso de sólidos a las tuberías, se genera una pérdida de energía al obstaculizar el flujo.
- **Pérdidas por ampliación:** Se origina al producir una ampliación en la sección transversal del tubo. Conviene que se lleve a cabo de manera gradual.
- **Pérdidas por reducción:** En este caso, ocurre un fenómeno similar a las pérdidas de entrada, debido a la contracción que sufre el líquido. De la misma manera, conviene que sea gradual.
- **Pérdidas por cambio de dirección:** Se dan cuando hay un cambio en el sentido rectilíneo que lleva el flujo en razón de su inercia, lo cual modifica la distribución de sus velocidades.
- **Pérdidas por válvulas:** debido al paso del agua a través de los dispositivos internos de la válvula, su magnitud depende del tipo de válvula y del grado de apertura de la misma.
- **Pérdidas por salida:** se obtienen mediante la expresión

$$h_s = \frac{(v_s - v_2)^2}{2g} \quad (21)$$

- **Pérdidas por bifurcación:** Depende del ángulo de la bifurcación al que se somete el flujo, la relación de diámetros de ambas tuberías y de la dirección de la corriente.
- **Pérdidas en cruceo:** Intervienen aspectos como la bifurcación y mezclado en tiempo paralelo del flujo dentro del cruceo y la generación de turbulencia y recirculación provenientes del movimiento convectivo del fluido.

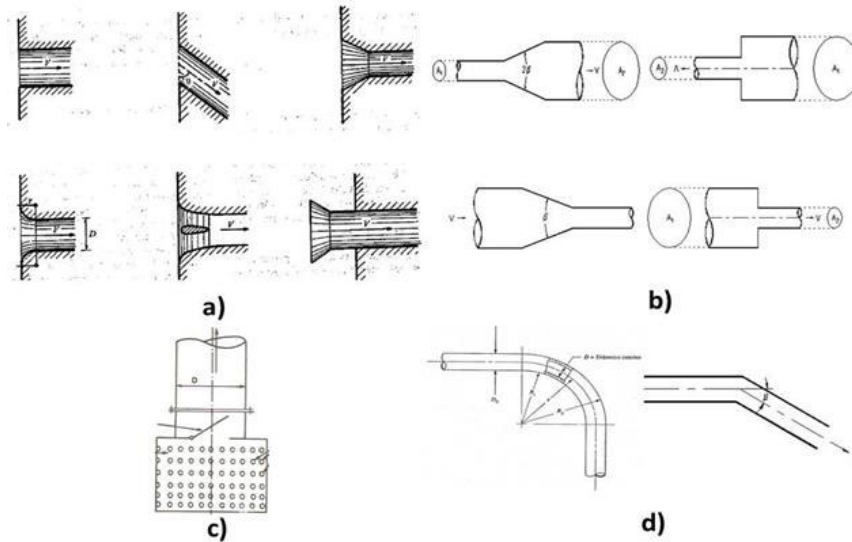


Figura 12. Algunos esquemas de accesorios para pérdidas secundarias: a) pérdidas por entrada b) pérdidas por reducción/ampliación c) pérdidas por rejilla, d) pérdidas por cambio de dirección

En los últimos 70 años, diferentes métodos numéricos han sido usados para estimar los caudales y presiones en redes de distribución de agua. Estos métodos van desde aproximaciones gráficas, basadas en

analogías físicas, métodos iterativos y hasta complejos sistemas matriciales para la solución numérica de ecuaciones no lineales. El análisis de redes por computadora es el proceso de emplear un modelo matemático contenido en un programa de computadora para simular el funcionamiento hidráulico de un sistema de distribución de agua potable, así como para definir las características del sistema para cumplir con criterios preestablecidos de diseño en lo referente a gastos y presiones disponibles (CNA, 2007).

3.1.3. Análisis en régimen permanente.

En cuanto al análisis en ***régimen permanente***, el objetivo de un programa de cómputo es calcular el gasto y la presión en la conducción, y los parámetros de operación de las bombas; para una condición de operación dada. Los programas pueden analizar tanto una sola conducción sencilla por bombeo o gravedad, como una red de conducción, un sistema de pozos, etcétera.

Recibe el nombre de régimen permanente, debido al hecho que este análisis permite derivar algunas incógnitas de manera que el flujo se mantiene constante por la red. En realidad, el flujo no se desarrolla en régimen permanente en casi ninguna ocasión, pero puede representar escenarios cuando los cambios en el tiempo son de pequeña magnitud y se desarrollan muy lentamente. Los resultados de este modelo reflejan ciertos parámetros a los cuales está sujeta la red. Generalmente estos valores son de carácter máximo, es decir, las condiciones de la red se calculan para la conducción de agua a su máximo caudal y presión. Con ello, el diseño abarca los escenarios medios y mínimos sin preocuparse totalmente de ellos.

Para desarrollar el análisis en régimen permanente se requiere de los siguientes elementos:

- Características de todas las conducciones (longitud, diámetros, rugosidad)
- Características en todos los elementos especiales.
- Consumo y cota geométrica en los nodos.
- Altura piezométrica de la fuente de referencia.

El análisis permite el conocimiento de las siguientes variables:

- Caudales que circulan por la tubería.
- Alturas piezométricas y presiones en los nodos.

3.1.4. Análisis en régimen no permanente.

En este caso, el régimen no permanente (o también régimen variable) se realiza considerando cambios en los caudales y en las demandas de consumo. Estos cambios tienen su valor en distintos intervalos de tiempo. Se analiza la evolución de las variables del sistema:

- Caudales
- Velocidades
- Presiones

- Calidad del agua
- etc.

3.1.5. Análisis en régimen transitorio.

Bajo esta denominación se estudian los fenómenos que acontecen como consecuencia de un cambio brusco en la velocidad de circulación del fluido, derivado de maniobras bruscas en la red o a variaciones rápidas de consumo. Las consecuencias de los escenarios anteriores pueden ser muy negativas, afectando incluso a la integridad física de la instalación. Las situaciones que son objeto de análisis en régimen transitorio son muy concretas y en otras ocasiones se trata de situaciones de emergencia o extraordinarias. Por ejemplo, en el arranque y parada de una bomba o grupos de bombeo. Es de suma importancia realizar estos ensayos en régimen no permanente, tanto para analizar situaciones transitorias críticas, con el objeto de establecer los casos en los que puede aparecer riesgo dentro de la red y estudiar medidas de corrección pertinentes.

Para el análisis en régimen transitorio suelen usarse los siguientes modelos:

- **Modelos rígidos o de oscilación de masa.** en los que únicamente se considera el efecto dinámico inducido por la inercia del fluido.
- **Modelos elásticos,** basados en las ecuaciones de golpe de ariete, en los que interviene además la compresibilidad del flujo y la elasticidad de las conducciones.

3.1.6. Programas de cómputo para análisis de redes.

EPANET: Desarrollado por la EPA y cuyos procesos pueden seguirse en Rossman (1997). Probablemente es el programa de análisis de más amplio uso. Resuelve el problema usando el método del gradiente.

KYPIPE: Desarrollado por la Universidad de Kentucky. Se trata de un programa implementado mediante la formulación por mallas y la aplicación de la teoría lineal. Es probablemente de los pocos programas que continúan aplicando la teoría de aplicación lineal como alternativa clara al método del gradiente.

H2ONET: Desarrollado por la empresa MW Soft Inc. (Montgomery Watson, 1996) y WATERCAD/WATERGEMS desarrollado por la empresa Haestad Methods. Son dos programas absolutamente similares distribuidos por dos casas comerciales diferentes. Basan totalmente sus procesos en el algoritmo desarrollado por la EPA para su programa EPANET. En la actualidad disponen de dos versiones claramente diferenciadas: una versión como aplicación independiente y otra versión como aplicación integrada en programas de diseño gráfico (AutoCAD®).

MIKE NET: Es un modelo desarrollado por el Danish Hydraulic Institute que al igual que los dos programas anteriores toma como punto de partida el algoritmo desarrollado por la EPA para EPANET. No obstante, presenta un entorno de trabajo orientado a aplicaciones con sistemas de información geográfica (SIG). De

hecho, dispone en sus versiones particulares unos módulos de conexión con paquetes de SIG de la familia Arc View®.

SARA (Software de Análisis de Redes de Agua): Desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia. Los detalles acerca del desarrollo de este modelo utilizan como punto de partida el modelo de desarrollo de EPANET. Dispone de algunas funciones específicas, como la gestión en nodos que quedan desconectados debido a mantenimiento o modificaciones en la red. Incluye así mismo capacidades de modelación de elementos de protección contra incendios, elementos de riego, etc.

3.2. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

3.2.1. Ecuaciones fundamentales de mecánica de fluidos

Para poder interpretar las nociones de movimiento que rigen en los fluidos en un volumen de control dado, es indispensable considerar los siguientes principios:

- El fluido es considerado como un medio continuo
- La masa de un fluido se mantiene constante
- La tasa de cambio del momentum equivale a la suma de fuerzas en una partícula de fluido (2da ley de Newton)
- La tasa de cambio de energía es igual a la suma de velocidad de adición de calor al flujo y al trabajo realizado en una partícula de fluido (1ra ley de termodinámica)

En una partícula de fluido se aplicarán estos principios, consideremos una con medidas conocidas en los lados δx , δy , δz . (figura 13):

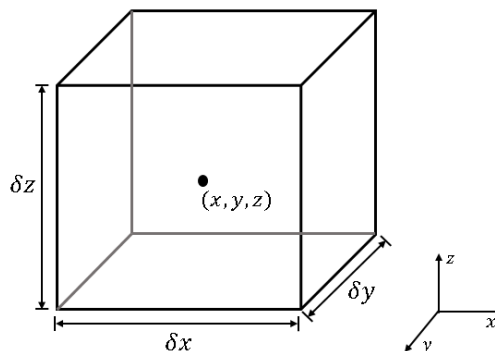


Figura 13. Elemento de fluido para las leyes de conservación.

Todas las propiedades de los fluidos son funciones del espacio y tiempo, así que estrictamente necesitamos escribir: $\rho(x,y,z,t)$, $p(x,y,z,t)$, $T(x,y,z,t)$ y $\mathbf{u}(x,y,z,t)$, correspondientes a la densidad, presión, temperatura y vectores de velocidad respectivamente. Por ejemplo, la presión p a las caras normales al eje X del cubo elemento de fluido, las cuales están a una distancia de $1/2\delta x$ desde el centro del elemento pueden ser expresadas como:

$$p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \quad \text{y} \quad p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \quad (22)$$

3.2.1.1. Ecuación de continuidad en tres dimensiones

La velocidad en el incremento de masa en el elemento del fluido es:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (23)$$

Con la que se estima el flujo de masa a través de las caras del elemento, y está dado por el producto de la densidad, área y la componente normal de velocidad a la cara del elemento. En la figura 14, se puede observar el flujo neto de masa en el elemento a través de sus caras:

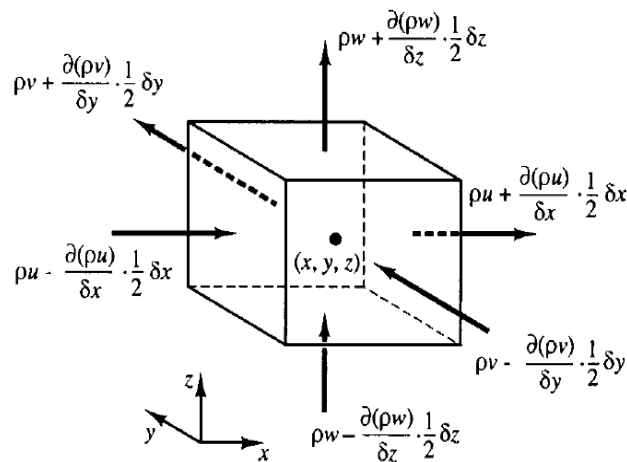


Figura 14. Flujo de masa hacia dentro y fuera del elemento de fluido.

$$\begin{aligned} & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (2.2)$$

Los flujos que están en dirección al elemento de fluido producen un incremento de masa en el elemento y toman el signo positivo y aquellos que están saliendo del elemento toman el signo negativo

La velocidad de incremento de masa dentro del elemento está ahora adecuado al flujo de masa hacia el elemento a través de las caras. Todos los términos resultantes del balance de masa son llevados al lado izquierdo de la igualdad para mantener el mismo signo y la expresión es dividida entre el volumen del elemento $\delta x \delta y \delta z$.

Esto significa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (24)$$

O en una más compacta notación vectorial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (25)$$

La ecuación anterior es la ecuación tridimensional de conservación de la masa o ecuación de continuidad para un punto en un fluido compresible. El primer término a la izquierda es el cambio en el tiempo de la densidad (masa por unidad de volumen). El segundo término describe el flujo neto de masa a la salida del elemento atravesando sus caras y es llamado el termino convectivo.

Para un fluido incompresible (es decir, un líquido) la densidad ρ es constante y la ecuación se convierte en:

$$\text{div}(\mathbf{u}) = 0 \quad (26)$$

O en su notación extendida:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (27)$$

3.2.1.2. Ecuación del Momentum en tres dimensiones.

La segunda ley de Newton establece que la tasa de cambio del momentum de una partícula de fluido equivale a la suma de las fuerzas en la partícula.

Tasa de cambio del momentum en una partícula de fluido	=	Suma de fuerzas en la partícula de fluido
--	---	---

Las tasas de cambio de x -, y - y z - momentum, por unidad de volumen en una partícula de fluido se describen como:

$$\rho \frac{Du}{Dt} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (28)$$

Se distinguen dos tipos de fuerzas en las partículas de fluidos:

- **Fuerzas superficiales**
 - Fuerzas de presión
 - Fuerzas viscosas

- **Fuerzas en el seno del cuerpo**
 - Fuerza gravitacional
 - Fuerza centrífuga
 - Fuerza coriolis
 - Fuerzas electromagnéticas

El estado de tensión de una partícula de fluido está definido en términos de la presión y de los nueve componentes tensoriales de viscosidad mostrados en la figura 15.

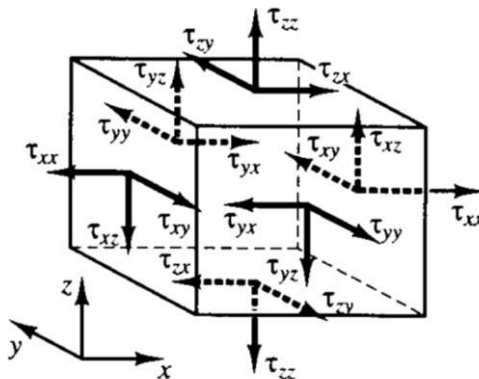


Figura 15. Componentes tensoriales de una partícula de fluido.

La presión, que es un tensor normal, es denotada por p . Los tensores viscosos son denotados por τ . La notación de sufijos usual es τ_{ij} . Es aplicada para indicar la dirección de los componentes tensoriales viscosos. Los sufijos i y j en τ_{ij} indican que el componente tensorial actúa en la dirección j en una superficie normal a la dirección i .

Consideremos las componentes en la dirección x , de las fuerzas de presión p y las componentes tensoriales τ_{xx} , τ_{yx} , τ_{zx} mostradas en la figura 16.

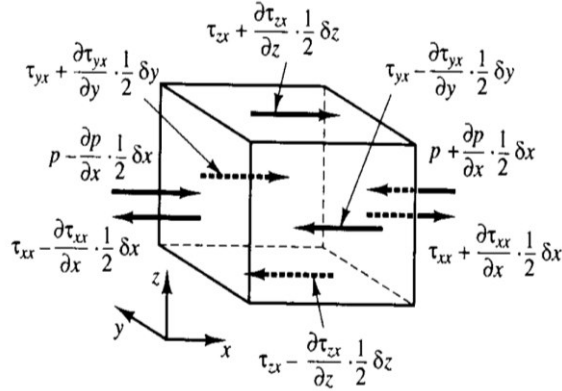


Figura 16. Componentes tensoriales en la dirección x .

La magnitud de una fuerza resultante de una tensión en la superficie es el producto del tensor por el área. Las fuerzas alineadas en dirección al eje coordenado adquieren un signo positivo y aquellos en la dirección opuesta toman signo negativo. La fuerza neta en la dirección x es la suma de las componentes de fuerza actuando en dicha dirección en la partícula de fluido.

Por ejemplo, en el par de caras del elemento (E y W), tenemos:

$$\begin{aligned} & \left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z + \left[- \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\ & = \left(- \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \end{aligned} \quad (29a)$$

La fuerza neta en la dirección x en el par de caras (N, S) es:

$$- \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (29b)$$

Finalmente, la fuerza neta en la dirección x , en las caras (Top y Bottom) están dadas por:

$$- \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y + \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (29c)$$

La fuerza total por unidad de volumen en el fluido debido a estas fuerzas tensoriales es igual

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (30)$$

Sin tener en cuenta las fuerzas de cuerpo con más detalle, su efecto global puede ser incluido mediante la definición de un parámetro \mathbf{S}_{Mx} del momentum en dirección x , por unidad de volumen por

unidad de tiempo. La ecuación de momentum en la componente x , es encontrada describiendo el cambio de momentum en la misma componente x de la partícula de fluido, la cual equivale a la fuerza total en la dirección x en el elemento debido a las fuerzas tensoriales superficiales más el incremento del momento en x debido a los parámetros S_{Mi} .

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (31)$$

No es difícil verificar que la ecuación de momentum en la componente y está dada por:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (31b)$$

De manera similar, la ecuación del momentum en la componente z es:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (31c)$$

Los efectos de los esfuerzos en las superficies se asignan a los términos S_{Mx} , S_{My} , S_{Mz} . Incluyen contribuciones de las fuerzas en el cuerpo solamente. Por ejemplo, la fuerza del cuerpo debido a la gravedad podría ser modelada por $S_{Mx} = 0$, $S_{My} = 0$, $S_{Mz} = -\rho g$.

3.2.1.3. La ecuación de la energía en tres dimensiones.

La ecuación de la energía es derivada de la primera ley de termodinámica, la cual establece que el cambio de energía en una partícula de fluido equivale a la velocidad de adición de calor en la partícula de fluido más la velocidad de trabajo realizado en la partícula. La tasa de incremento de energía para una partícula de fluido por unidad de volumen está dada por:

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (32)$$

Hasta ahora, no se ha definido la energía específica E en un fluido. Regularmente la energía de un fluido es definida como la suma de la energía interna i (térmica), la energía cinética ($1/2 (u^2 + v^2 + w^2)$) y la energía potencial gravitacional. Esta definición describe que el elemento de fluido almacena o contiene

energía potencial gravitacional. A continuación se definirá el parámetro de energía S_E , por unidad de volumen por unidad de tiempo.

La conservación de la energía en una partícula de fluido se asume en la ecuación de la tasa de cambio de energía en la partícula de fluido como la suma del flujo neto de trabajo aplicado sobre una partícula de fluido más el flujo neto de la adición de calor hacia el fluido más la tasa de incremento de energía debido a los parámetros. La ecuación queda como:

$$\rho \frac{DE}{Dt} = [-div(p\mathbf{u})] + \left[\frac{\partial(\mathbf{u}\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\mathbf{u}\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\mathbf{u}\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(\mathbf{v}\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\mathbf{v}\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\mathbf{v}\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(\mathbf{w}\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\mathbf{w}\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\mathbf{w}\tau_{zz})}{\partial z} \right] + div(k grad T) + S_E \quad (33)$$

En la ecuación anterior, tenemos $E = \mathbf{i} + (1/2)(\mathbf{u}^2 + \mathbf{v}^2 + \mathbf{w}^2)$.

La parte de la ecuación de energía relacionada a la energía cinética puede ser determinada multiplicando la ecuación del momentum en la dirección x , por la componente de velocidad \mathbf{u} , la ecuación del momentum en la dirección y por la componente \mathbf{v} y la ecuación del momentum hacia z , por la componente \mathbf{w} . Esto genera la siguiente ecuación para la energía cinética:

$$\rho \frac{D\left[\frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)\right]}{Dt} = -\mathbf{u} \cdot grad p + u \left(\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} \right) + w \left(\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z} \right) + \mathbf{u} \cdot S_M \quad (34)$$

definiendo un nuevo término $S_i = S_E - \mathbf{u} \cdot S_M$, se produce la ecuación de la energía interna:

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p div \mathbf{u} + div(k grad T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i \quad (35)$$

De una manera similar se puede encontrar la ecuación para la energía debido al cambio de temperatura.

3.2.2. Ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido Newtoniano.

Las ecuaciones que rigen el movimiento de un fluido contienen entre sus incógnitas las componentes tensoriales viscosas τ_{ij} . Las formas más usuales de ecuaciones de conservación para flujo de fluidos son obtenidas introduciendo un modelo adecuado para tensores viscosos τ_{ij} . En muchos flujos de fluido, los tensores viscosos pueden ser expresados como funciones de tasas de deformaciones locales (o

velocidad de deformación). En flujos tridimensionales, la velocidad de deformación local está compuesta de la velocidad de deformación lineal y de la velocidad de deformación volumétrica.

Todos los gases y la mayoría de los líquidos son isotrópicos. Los Líquidos que contienen cantidades significativas de moléculas de polímeros podrían exhibir propiedades viscosas anisotrópicas como resultado del alineamiento tipo cadena de moléculas de polímeros con el flujo. Aquellos fluidos son de un grado distinto de estudio para su resolución, por lo que se seguirá asumiendo que los fluidos son isotrópicos.

La velocidad de deformación de un elemento de fluido tiene nueve componentes en tres dimensiones, seis de ellas son independientes en fluidos isotrópicos. Se denotan por el símbolo e_{ij} . El sistema de sufijos es idéntico al de los componentes tensoriales. Existen tres componentes de deformación de alargamiento:

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad e_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (36a)$$

También son seis las componentes de deformación en dirección perpendicular

$$e_{xy} = e_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$e_{xz} = e_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (36b)$$

$$e_{yz} = e_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

La deformación volumétrica está dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div } \mathbf{u} \quad (36c)$$

En un fluido newtoniano, los esfuerzos tensoriales viscosos son proporcionales a las velocidades de deformación. La forma tridimensional de la Ley de Newton de viscosidad para flujo de fluidos compresibles envuelve dos constantes de proporcionalidad: el primero es la viscosidad dinámica, μ , para relacionar los esfuerzos a las deformaciones lineales, y la segunda es una viscosidad λ , la cual es utilizada para relacionar los esfuerzos a la deformación volumétrica. De las nueve componentes tensoriales viscosas, seis de ellos son independientes:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \text{div } \mathbf{u}$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \text{div } \mathbf{u}$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \quad (37)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

No se sabe mucho acerca de la segunda viscosidad, debido a que su efecto es demasiado pequeño en la práctica. Para gases, un buen trabajo de aproximación puede ser obtenido tomando el valor de $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$. Los líquidos son incompresibles, así que la ecuación de conservación de la masa sería: $\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$ y los esfuerzos viscosos son sólo el doble de la tasa local de tiempos de deformación lineal de la viscosidad dinámica. La sustitución de los esfuerzos de deformación de cizalla en las ecuaciones 36 a-c producen las muy conocidas ecuaciones de Navier-Stokes, llamadas así por los 2 científicos del siglo XIX quienes las derivaron de manera independiente.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{Mx}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{My}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \right] + S_{Mz}$$

A veces es útil reorganizar los términos de esfuerzos viscosos como sigue:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \operatorname{div} \mathbf{u}) \\ &= \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) + S_{Mx} \end{aligned}$$

Los esfuerzos viscosos en las ecuaciones de las componentes y - y z - pueden reorganizarse de manera similar a la anterior. Definiendo un nuevo parámetro, lo englobamos en:

$$S_M = S_M + S_{momentum}$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden ser escritas en la forma más usual para su desarrollo o estudio mediante el método de volúmenes finitos:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz}$$

3.2.3. Turbulencia y su modelación

Todos los flujos encontrados en la práctica de ingeniería, tanto bidimensionales (chorros de agua, flujo en tuberías, etc.) como tridimensionales complejos se vuelven inestables a ciertos valores del número de Reynolds. A valores bajos, se considera flujo laminar, mientras que a grandes valores, el flujo se vuelve turbulento. Muchos, si no es que la mayoría, de los flujos en problemas ingenieriles son altamente turbulentos. Para tener una respuesta ante los efectos del flujo turbulento, se requieren herramientas viables para su representación y simulación.

¿Qué es la turbulencia?

El número de Reynolds de un cierto flujo nos da una medida de la importancia relativa de las fuerzas de inercia (asociados con las fuerzas convectivas) y las fuerzas viscosas. En experimentos sobre sistemas de fluidos se observa que los valores por debajo de los llamados "valores críticos", son de comportamiento suave y las capas de fluido (como hojas o láminas) fluyen de una manera muy ordenada. Si se aplican condiciones de contorno y estas no cambian en el tiempo, se dice que el flujo es estable. Este régimen es llamado **flujo laminar**.

Para todos los valores por encima de los llamados "valores críticos", se da lugar a una complicada serie de eventos que eventualmente llevan a un cambio radical del carácter del flujo. En la etapa final, el comportamiento del flujo es totalmente caótico y aleatorio. El movimiento se vuelve intrínsecamente inestable aun cuando se imponen condiciones de contorno constante. La velocidad y todas las otras propiedades del flujo varían de una forma aleatoria y caótica. Este régimen es llamado **flujo turbulento**.

Las partículas de fluido, las cuales inicialmente se encuentran separadas por una cierta distancia pueden ser llevadas muy cerca unas de las otras por movimientos arremolinados en flujos turbulentos. Como consecuencia, el calor, el momentum y la masa son efectivamente intercambiados. Por ejemplo, una

inyección de tinta que se introduce en un punto del flujo turbulento rápidamente se dispersará a través del curso del flujo. Tal mezcla efectiva alcanza grandes valores de coeficientes de difusión para masa, momentum y calor.

3.2.3.1. Transición de flujo laminar a flujo turbulento.

La causa inicial de la transición hacia la turbulencia puede ser explicada considerando la estabilidad de los flujos laminares en pequeñas perturbaciones. El punto donde primeramente ocurre la inestabilidad es siempre aguas arriba del punto de transición a un flujo totalmente turbulento. La distancia entre el punto de inestabilidad, donde el número de Reynolds equivale a $Re_{x,crit}$, y el punto de transición $Re_{x,tr}$ depende del grado de amplificación de las perturbaciones inestables. El punto de inestabilidad y el comienzo del proceso de transición puede ser predicho con la teoría lineal de inestabilidad hidrodinámica. Aun así, no existe una teoría comprensiva que estudie la transición de inestabilidad inicial a un flujo totalmente turbulento.

3.2.3.2. Transición en un flujo en tubería.

Esta transición representa un ejemplo de una categoría especial de flujos sin un punto de inflexión. La teoría de inestabilidad hidrodinámica en la parte de viscosidad predice que esos flujos son incondicionalmente estables a una perturbación infinitesimal en todos los números de Reynolds. Prácticamente, la transición a la turbulencia se llega a dar entre $Re = 2000$ y 10^5 . Algunos detalles todavía no están claros, por ejemplo, aquellos que ilustran limitaciones en la teoría de estabilización.

La causa del fallo aparente de esta teoría es basada en los roles de la distorsión ocurrida en el perfil de velocidades en la entrada y las perturbaciones de amplitud finita debido a los efectos de entrada. Resultados de experimentos muestran que el flujo en tuberías, así como en la capa límite de placa plana, aparecen dichas perturbaciones en forma de puntos cerca de la pared. Estos surgimientos tienden a desarrollarse y finalmente llenar la sección de tubería con esas perturbaciones turbulentas.

En los flujos ocurridos en tuberías industriales, las formaciones intermitentes de perturbaciones turbulentas se dan con números de Reynolds alrededor de 2000, dando la alternancia de transición con flujos turbulentos y flujos laminares a lo largo de las tuberías. A valores de Reynolds arriba de 2300, las líneas turbulentas tienden a unirse y la tubería entera se llena de flujo turbulento.

3.2.3.3. Efecto de la turbulencia en las ecuaciones promediadas en el tiempo de Navier-Stokes.

La diferencia crucial entre las visualizaciones de flujos laminares y turbulentos es la aparición de movimientos arremolinados de un amplio rango de longitudes de escala en flujos turbulentos. Un dominio típico de flujo de 0.1m por 0.1m con un alto valor de Reynolds podría contener movimientos arremolinados

en el curso entre 10 a 100 μm de tamaño. Se necesitarían compilar modelos con malla de 10^9 a 10^{12} puntos para ser capaces de describir el proceso en todas las longitudes de escala.

Con el avanzado poder computacional de los últimos años apenas se han podido modelar las arremolinaciones en unos flujos muy simples con valores de Reynolds en transición. Los requerimientos computacionales para una solución directa de las ecuaciones promediadas en el tiempo de Navier-Stokes para flujos totalmente turbulentos a altos números de Reynolds son verdaderamente eficientes y aún se espera un mejor desarrollo de hardware computacional.

3.2.4. Modelos de turbulencia

Un modelo de turbulencia es un algoritmo computacional para encontrar solución al siguiente sistema de ecuaciones:

Ecuaciones de Reynolds

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \text{div}(\rho U \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } U) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right] + S_{Mx}$$

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \text{div}(\rho V \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } V) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] + S_{My}$$

$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \text{div}(\rho W \mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } W) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] + S_{Mz}$$

Ecuación de transporte escalar

$$\frac{\partial(\rho \Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \Phi \mathbf{U}) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad } \Phi) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'\phi'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'\phi'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'\phi'})}{\partial z} \right] + S_{\Phi}$$

Con esto, una gran variedad de problemas de flujo pueden ser calculados. Para la mayoría de propósitos de ingeniería, es innecesario resolver a detalle las fluctuaciones de turbulencia. Sólo los efectos de turbulencia son buscados para algún flujo medio. En particular, siempre se necesitan expresiones para los tensores de Reynolds y los términos de transporte escalar en las ecuaciones anteriores. Para que un modelo de turbulencia sea útil en un código de CFD, debe ser de gran aplicabilidad, preciso, simple y computacionalmente económico. Los modelos de turbulencia más comunes son clasificados en la tabla 6.

Tabla 6. Algunos modelos de flujo turbulento para CFD

Modelos clásicos	Basados en ecuaciones de Reynolds (promediadas en el tiempo). 1.- Modelo de ecuación zero - modelo de longitud de mezcla 2.- Modelo de 2 ecuaciones – modelo $k-\epsilon$ 3.- Modelo de ecuaciones tensoriales de Reynolds 4.- Modelo algebraico de tensores.
Large Eddy simulation	Basados en las ecuaciones filtradas espacialmente

Los modelos clásicos utilizan las ecuaciones de Reynolds descritas anteriormente y forman la base de los cálculos para turbulencia en los códigos CFD comerciales disponibles en la actualidad. Los modelos de turbulencia de Large eddy simulation, son modelos donde las ecuaciones de flujo dependientes del tiempo son resueltas para un flujo medio y donde los efectos de grandes y pequeñas arremolinaciones son también modeladas.

De los modelos clásicos de longitud de mezcla y el modelo $k-\epsilon$ son por mucho, los modelos más ampliamente utilizados y validados. Están basados en la suposición de que existe una analogía entre la acción de los esfuerzos viscosos y los esfuerzos tensoriales de Reynolds en el flujo medio. Ambos esfuerzos aparecen al lado derecho de las ecuaciones de momentum y en las leyes de la viscosidad de Newton se toman las tensiones viscosas para ser proporcional a la tasa de deformación de los elementos del fluido. Para un fluido incompresible:

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Con el fin de simplificar la notación, se puede describir utilizando la notación con sufijos. La convención de esta notación es que si i o $j = 1$, corresponde a la dirección x , de la misma manera, si i o $j = 2$, corresponde a la dirección de y , así también, i o $j = 3$, será en la dirección z . Por ejemplo:

$$\tau_{12} = \mu e_{12} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) = \left(\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial x}{\partial y} \right)$$

Se observa experimentalmente que la turbulencia decae a menos que haya cizalla en flujos incompresibles isotérmicos. Además, las tensiones turbulentas tienden a aumentar a medida que la tasa media de deformación también aumenta.

El modelo $k-\epsilon$ es más sofisticado, pero también es algo costoso computacionalmente, y en general describe la producción y destrucción de la turbulencia en un flujo medio, además de utilizar las diferentes propiedades como difusión y convección del flujo. Se resuelven dos ecuaciones de transporte (que son ecuaciones diferenciales parciales), una para la energía cinética turbulenta k y otra para medir la disipación ϵ de dicha energía cinética turbulenta. Una suposición para este modelo es que la viscosidad turbulenta μ_t es isotrópica, en otras palabras, que es la medida proporcional entre esfuerzos de Reynolds y la media de velocidad de deformación es la misma en todas las direcciones. Esta suposición tiende a fallar en algunas

categorías de flujo, con lo que probablemente se tengan resultados no aproximados de simulación. Así que es necesario derivar y resolver las ecuaciones de transporte para los mismos esfuerzos de Reynolds. Los esfuerzos de Reynolds sólo aparecen al lado izquierdo de la ecuación del momentum.

3.2.4.1. El modelo $k - \varepsilon$

Si la convección y la difusión de las propiedades turbulentas pudieran ser omitidas, sería posible expresar la influencia de la turbulencia en algún flujo medio en términos de la longitud de mezcla. Si la convección y difusión no pueden ser omitidas, entonces una expresión algebraica compacta no es tan factible de describir. Un buen camino para ello es considerar los estados relacionados con la dinámica de turbulencia. El modelo $k - \varepsilon$ se enfoca en los mecanismos que tienen efecto en la energía cinética turbulenta.

3.2.4.2. Ecuaciones del modelo $k - \varepsilon$

Es posible desarrollar ecuaciones de transporte similares para todas las demás magnitudes de turbulencia, incluyendo la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta ε . La ecuación exacta, sin embargo, contiene muchos términos desconocidos y no medibles. Se utiliza k y ε para definir la velocidad de escala ϑ y la longitud de escala l representativo de la longitud real de turbulencia como sigue:

$$\vartheta = k^{\frac{1}{2}} \quad l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$$

Se define también la viscosidad cinética como sigue:

$$\mu_t = C_\mu \cdot \rho \cdot \vartheta \cdot l = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (38)$$

Donde C_μ es una constante adimensional.

El modelo estándar $k - \varepsilon$ utiliza las siguientes ecuaciones de transporte usadas para k y ε :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (39)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (40)$$

Se describe como:

Velocidad de cambio de k o ε	+	Transporte de k o ε por convección	=	Transporte de k o ε por difusión	+	Tasa de producción de k o ε	-	Tasa de destrucción de k o ε
--	---	--	---	--	---	---	---	--

Las ecuaciones contienen cinco constantes ajustables $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$. El modelo $k - \varepsilon$ estándar emplea valores para las constantes obtenidas por una amplia información de un gran número de flujos turbulentos:

$$C_\mu = 0.09; \quad \sigma_k = 1.00; \quad \sigma_\varepsilon = 1.30; \quad C_{1\varepsilon} = 1.44; \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad (41)$$

La producción o destrucción de la energía cinética turbulenta siempre están estrechamente vinculados. La velocidad de disipación ε es grande, donde la producción de k es grande. El modelo de ecuaciones para ε supone que sus términos de producción y destrucción son proporcionales a las condiciones de producción y la destrucción de la ecuación k . La adopción de dichas formas asegura que ε aumenta rápidamente si k aumenta rápidamente y que disminuye suficientemente rápido para evitar (no físicamente) los valores negativos de la energía cinética turbulenta si k disminuye.

Los modelos presentados en este capítulo se comprenden en la implementación de Dinámica de Fluidos Computacional, la cual se basará en el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ para flujo monofásico incompresible. El siguiente capítulo describirá la parte experimental de la que se tomarán los registros necesarios para su interpretación en CFD y los escenarios que se propondrán para analizar la mezcla de soluto en uniones de cruz, variando las concentraciones a las entradas de cruce. Todo esto debe verificarse, por lo que también se hará mucho énfasis en validar el modelo mediante la obtención de curvas DTR.

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE MEZCLA

Para describir la implementación del análisis de mezcla en cruceros, se realizarán ensayos experimentales en campo mediante un dispositivo en físico, así como simulaciones en CFD a diversas condiciones de operación. Este capítulo se dividirá en tres puntos principales, hidrodinámica, transporte de soluto y descripción de escenarios propuestos.

4.1. ESCENARIOS DE HIDRODINÁMICA

Esta parte de la experimentación comprende que se tengan los datos necesarios y confiables realizados en físico para su representación en CFD. Cuando se analiza un estado de calidad de agua en redes, la concentración de cloro u otros solutos pueden ir variando en función del nivel de reacción que presenten durante largos periodos de tiempo, sin embargo, **los escenarios que se presentan serán en régimen permanente para la parte de hidrodinámica para verificar la representación adecuada de los modelos.** Debido a esto, la validación en la parte hidrodinámica será la representación de lo medido en campo (de manera correcta) simulado en CFD, con un margen de error relativamente bajo.

4.1.1. Hidrodinámica experimental

La parte experimental debe comprender la medición más precisa posible. En este ambiente pueden surgir ciertos errores de medición para los cuales se hacen correcciones que garanticen la continuidad del experimento (lo que ingresa debe ser lo mismo a lo que sale).

4.1.1.1. Red experimental de distribución de agua

Para el desarrollo de un ensayo en físico, se seleccionó un crucero de la red experimental de distribución de agua (Figura 17) en el laboratorio "La Perlita" de la División de Ingenierías del Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato. Se muestra a continuación un trazo de la red y la localización del crucero seleccionado:

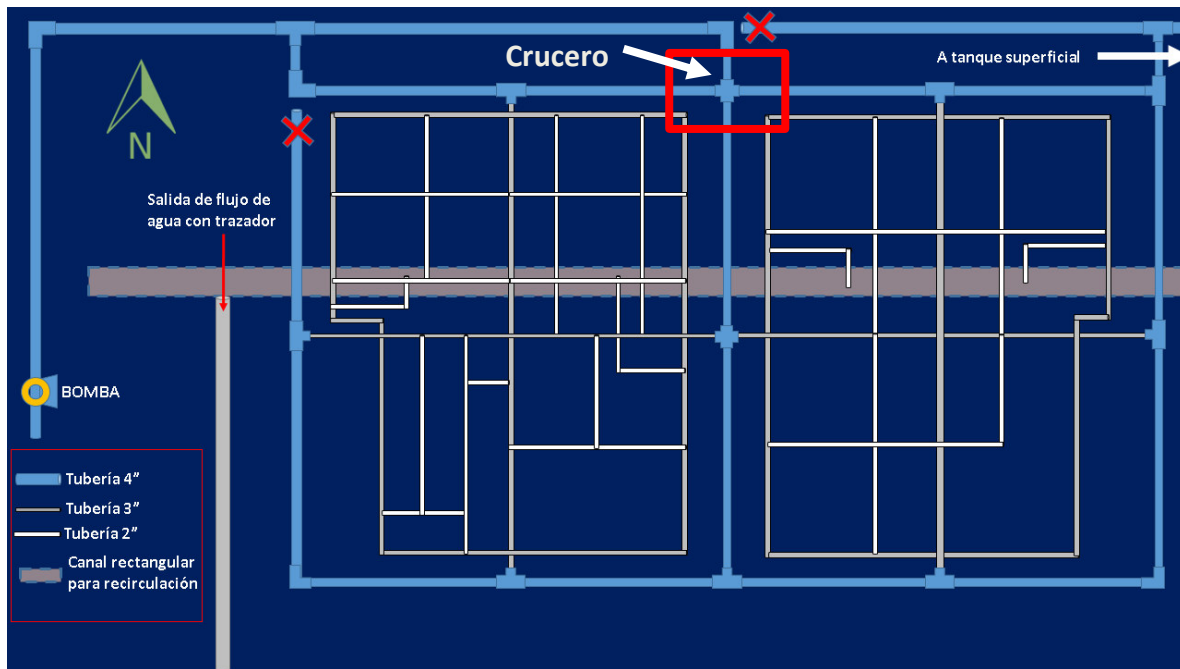


Figura 17. Trazo de la red experimental del laboratorio “La Perlita”. Localización del crucero para la realización de los ensayos.

La red está compuesta por componentes que permiten realizar experimentos a diferentes escalas y cuenta con dispositivos de control y medición que permiten ajustar las condiciones necesarias de ensayo a **condiciones reales de redes de agua potable**.

4.1.1.2. Descripción de las características y componentes del crucero

El material del crucero es hierro galvanizado, de 4 pulgadas de diámetro. Los caudales son impulsados por un equipo de bombeo de 15HP, los cuales alcanzan los 30lt/s a presiones de 1.78bar para las tuberías del crucero. Se cuenta con válvulas de compuerta abierta en cada frontera y para el control de velocidad del flujo para entradas y salidas. Están posicionadas a distancias desde 2m hasta 7.5m del crucero. Esto con el fin de disminuir turbulencia generada por la obstrucción de la compuerta y el flujo pueda uniformizarse a lo largo de la tubería.

Las condiciones de operación cercanas a sistemas de distribución reales, se pueden aproximar gracias a las características físicas de la red experimental. **Todos los ensayos experimentales son realizados contemplando caudales en dos entradas y dos salidas.** Las fronteras de entrada y salida que se establecerán para el modelo numérico son los puntos donde se ubican los dispositivos de medición de presión, se describen en la siguiente figura 19. Las tuberías de entrada y salida cuentan con longitud necesaria para regulación del curso del flujo (se verifica esto más adelante mediante los ensayos en CFD).

Para mejor referencia de cada sección, se nombra a los contornos como los puntos cardinales, la entrada Norte corresponde a la entrada izquierda del crucero en la figura 17, la entrada Este es el contorno superior

de la misma figura y así sucesivamente para las salidas Sur y Oeste (Figura 18), además se realiza el modelo numérico en espejo para mantener la dirección flujo con sentido de izquierda a derecha y de arriba a abajo.

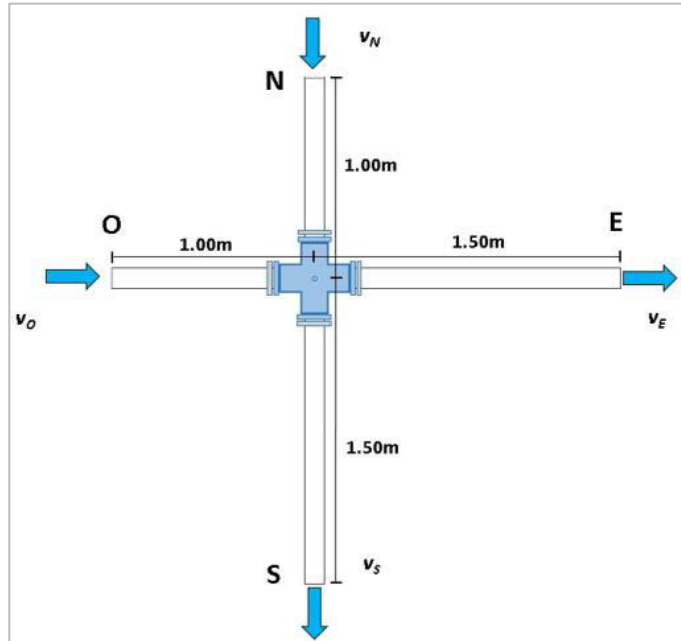


Figura 18. Distancias de puntos de medición respecto al cruceo. Dirección de flujos en entradas y salidas.

Para mejor referencia de cada sección, se nombra a los contornos como los puntos cardinales, la entrada Norte corresponde a la entrada izquierda del cruceo, la entrada Este es el contorno superior y así sucesivamente para las salidas Sur y Oeste (Figura 19)

Los caudales a las entradas Norte y Este son medidos con el apoyo de dos medidores de caudal, uno de tipo electromagnético, marca Dorot, modelo MC608-A (Figura 20a). El segundo es un medidor de propela, Hidrónica, modelo MP-0400 (Figura 20b), ambos con digitalizador de datos de medición. Para las salidas, el agua es conducida hasta 4 medidores, 2 para cada salida. Los medidores que miden el flujo a la salida Este son de tipo electromagnético, marca Badger Meter Inc., modelo M2000 (Fig. 20c). Para la salida Sur, el agua se conduce a dos medidores volumétricos de propela (Fig. 20d).



Figura 19. Dispositivos de medición de caudal.

Para trabajar en las condiciones de similitud a redes reales y como datos necesarios para el CFD, se registra la presión en los cuatro contornos del cruce. Para ello, se dispone de un osciloscopio de almacenamiento digital con cuatro canales de medición, marca Tektronix® modelo TDS-2004C (Figura 20a). En este caso, el osciloscopio representa visualmente en coordenadas las señales eléctricas captadas por transductores de presión. Éstos, de marca WIKA® modelo S-10 (Figura 20b), comprenden un rango de medición de 0-10V de intensidad de señal eléctrica correspondiente al rango -1 a 9 bares de presión.

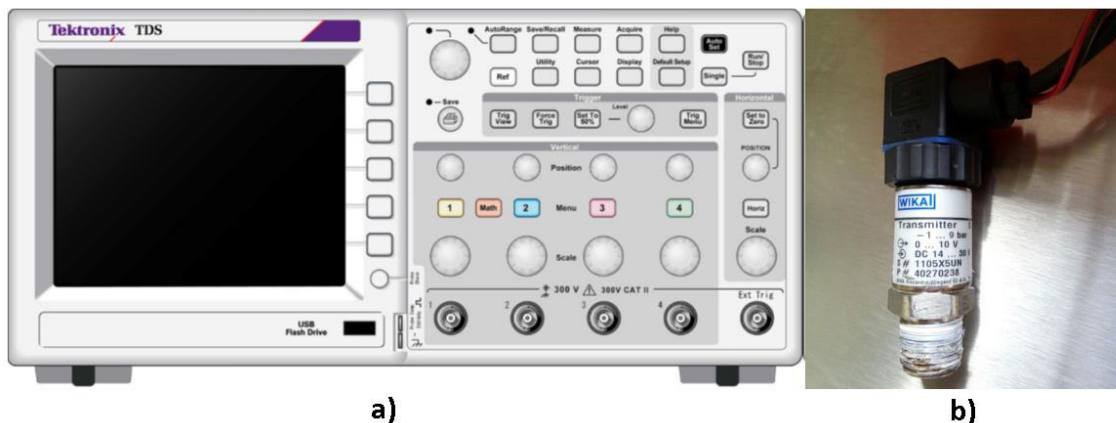


Figura 20. Osciloscopio y transductores de presión utilizados.

4.1.1.3. Estimación de errores y ajustes a las pruebas

Es muy probable la detección de errores de medición de caudales incluso cuando se verifica que no exista ningún tipo de fuga en el sistema. Incluso, cuando los medidores fueran del mismo tipo, pueden tener errores diferentes. En este trabajo, las causas de error de medición pueden ser debido a la diferencia de los tipos de medidores, la ubicación y el parámetro de error propio de operación del medidor (mejor funcionamiento en condiciones ideales, velocidades muy bajas o excesivas de flujo, etc.).

El principio de continuidad (ecuación 42) se debe cumplir en esta experimentación, con lo que es necesario corregir la diferencia de mediciones que se presenten.

$$\sum Q_{Ent} = \sum Q_{Sal} \quad (42)$$

Donde:

- Q_{Ent} = Caudal de entrada
- Q_{Sal} = Caudal de salida

4.1.1.4. Errores mediante aforo volumétrico

Los medidores a las entradas (Figura 19a y b) se validaron realizando una prueba de aforo volumétrico utilizando el tanque superficial perteneciente al mismo sistema de tuberías. Este tanque tiene dimensiones 4.982m de largo, 3.48m de ancho y 1.508m de profundidad. Se realizaron 6 sesiones de pruebas de aforo llenando cantidades de volumen del tanque en intervalos tiempo para la obtención de caudales con la siguiente ecuación (Eq. 43). Y con ello, establecer promedios que sirvan como referencia para el error de cada medidor.

$$Q = \frac{Vol}{t} \quad (43)$$

Donde:

- Q = caudal registrado en los medidores
- Vol = volumen de agua almacenado en el tanque
- t = intervalo de tiempo de prueba

Los aforos volumétricos en el tanque superficial se realizaron para verificar el error relativo (ecuación 45) de los medidores de las entradas (Figs. 19a y b), al mismo tiempo, permitiendo visualizar lo siguiente (Se muestra un ejemplo): Con el cálculo de errores se puede "*compensar*" la diferencia existente en las mediciones. Para estos, se verifica el grado de error en los dispositivos correspondientes y después se corrige el dato medido. Todo esto con el fin de garantizar el cumplimiento de la ecuación (42).

En la tabla 7 se calcula el gasto promediado a diferentes lapsos de tiempo, midiendo la altura que va alcanzando el agua en el tanque. La parte izquierda representa la medición de caudales, volúmenes y velocidades para el aforo. En la parte derecha se estiman errores respecto al caudal registrado durante la prueba.

4.1.1.5. Errores mediante vertedor triangular

Los medidores a la salida Este (Figura 19c) se verificaron con el apoyo de un vertedor triangular en el canal de recirculación. El vertedor es de pared delgada con un ángulo de 90° en el vértice. Está colocado en el canal de recirculación de la red experimental de distribución de agua. Únicamente fluye a través del mismo

el caudal de la salida Este, por lo que los errores estimados se aplicarán solamente a estos medidores. De manera similar, se realizó una sesión, pero a diferentes velocidades para abarcar el rango de posibles escenarios para los experimentos. Los cálculos para estas validaciones fueron estimados con las siguientes fórmulas:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan(\theta/2) \mu K h^{\frac{5}{2}} \quad (44)$$

Donde:

- Q = caudal
- g = la aceleración de la gravedad (9.81m/s²)
- θ = ángulo del vértice (grados Sexagesimales)
- h = altura de cresta (m)
- μ, K = parámetros para fórmulas propuestas de varios autores (descritos en Sotelo, 1991).

Aunque se trató de una sesión de validación mediante vertedor triangular, se estimaron los caudales que fluyeron a través del vertedor mediante tres formulaciones propuestas (Tabla 8) por Dalmau (1924) proveniente de la Universidad Católica de Chile, la segunda por Courley y Grimp (1909) y la última por Hegly (1921), todas las anteriores están descritas en el libro Hidráulica General, de Gilberto Sotelo Ávila (1991) . Se obtiene un error general que será el ajuste necesario para dichos medidores y con esto ajustar la continuidad en los ensayos.

Tabla 7. Estimación de errores para medidores de entradas Norte y Oeste (Fig 19 a y b) validando mediante aforo volumétrico (6 escenarios variando cuatro caudales mediante pruebas de aforo y se obtiene un error respecto a las medidas de los medidores aguas arriba).

med	Δt (seg)	h (cm)	Ah (m)	Vol (m ³)	Q (lps)	Vel (m/s)	LECTURAS	Q ELECTROM (lps)	Q PROPELA (lps)
0	---	150.8	---	---	---	---		25.4125	24.55
1	464.6	82.3	0.685	11.87	25.56	3.1529	Inicio	25.5029	Inicio 24.35
2	56.93	73.8	0.085	1.47	25.88	3.1928		25.3718	24.15
3	58.35	65.4	0.084	1.45	24.95	3.0785		25.0635	23.95
4	55.11	57.2	0.082	1.42	25.79	3.1819	Fin	25.0875	Fin 24.15
5	58.35	48.4	0.088	1.52	26.14	3.2251		25.0875	23.76
6	57.34	40.6	0.078	1.35	23.58	2.9089	Prom inic	25.4291	Prom inic 24.35
7	115.7	24.3	0.163	2.82	24.42	3.0127	Prom fin	25.0795	Prom fin 23.9533
				21.93	25.19	3.1075		Prom totl 25.2543	24.1517
				SUMA	PROMEDIO	PROMEDIO		Err resp. aforo 0.238%	4.138%

Tabla 8. Obtención de errores de medidores electromagnéticos a las salidas Este (Fig 19c) mediante validación con vertedor triangular. Para la estimación del caudal del vertedor, se utilizaron los parámetros μ y K provenientes de 3 fórmulas empíricas descritas en Sotelo (1991). Se obtiene el error respecto a lo medido en los caudalímetros y posteriormente se saca un promedio general que será el que proporcione a las pruebas que se ajustarán para ejecutarse en CFD.

PRUEBAS	Q Propela (lps)	Q medidores (lps)	h med (cm)	B (cm)	B/h	K	μ (ref1)	Q (lps) (ref 1)	Error (ref1)	Q (lps) (ref2)	Error (ref2)	μ (ref3)	Q (lps) (ref 3)	Error (ref3)	QPROM	Error promedio
P1	5.89	5.2730	0.1090	33	3.028	1.03	0.5895	5.6265	6.282%	5.4124	2.576%	0.6271	5.8110	9.258%	5.6166	6.1179%
P2	2.855	2.7070	0.0855	33	3.819	1.01	0.5950	3.1151	13.100%	3.0418	11.006%	0.6301	3.2662	17.122%	3.1410	13.8184%
P3	5.415	4.9043	0.1030	33	3.254	1.02	0.5920	4.6705	5.006%	4.5243	8.401%	0.6273	4.8523	1.072%	4.6824	4.7404%
P4	8.605	7.6817	0.1205	33	2.679	1.04	0.5855	7.6636	0.235%	7.3331	4.753%	0.6284	7.9090	2.875%	7.6353	0.6078%
P5	9.24	8.3263	0.1295	33	2.562	1.07	0.5867	8.8295	5.699%	8.1878	1.692%	0.6295	8.8543	5.963%	8.6239	3.4502%

4.1.1.6. Ajustes a las pruebas de hidrodinámica

Después de realizar pruebas para diferentes condiciones de velocidad y presión, se registraron los datos medidos para posteriormente hacer corrección con los errores calculados de las validaciones anteriores (aforo volumétrico y vertedor triangular). A continuación se muestra un ejemplo de un ensayo realizado:

Tabla 9. EJEMPLO de medición de presiones y caudales en el crucero (prueba sin realizar ajustes).

EXPERIMENTO EN FÍSICO	ENTRADAS		SALIDAS	
	O	N	S	E
Presión(bar) =	1.22	1.22	1.22	1.21
Re =	195,105.7	105,494.8	106,400.2	184,804.1
Vel(m/s) =	1.941	1.049	1.059	1.839
Q (lps) =	15.740	8.511	8.584	14.909
	SUMA Q ENT -> 24.2507 lps		SUMA Q SALIDAS-> 23.4926 lps	

Se definió a la lectura del medidor electromagnético (20a) como lectura apropiada sin necesidad de corrección, ya que existe un error mínimo en todas las pruebas (Esto se verificará en el siguiente capítulo). La medición del medidor de propela (20b) se corregirá mediante la siguiente fórmula:

$$P_{corr} = P \pm E * error(P) \quad (45)$$

Donde E y P son las lecturas de los medidores electromagnético y de propela respectivamente. P_{corr} son las mediciones ya corregidas por medio de la ecuación. Los errores obtenidos para cada medidor se ajustan mediante las fórmulas anteriores, añadiendo o sustrayendo el valor del error al caudal medido. Un procedimiento similar se realiza con la ecuación 45 para las pruebas de los medidores a las salidas (Figura 20c y d) utilizando los errores del vertedor triangular. Con estos ajustes se corrige la diferencia generado por error de medición (tabla 10), satisfaciendo la ecuación 42. Para estos, se verifica el grado de error en los dispositivos correspondientes y después se corrige el dato medido. Una vez encontrados los errores.

Tabla 10. CONTINUACIÓN DE EJEMPLO. Los datos son ajustados mediante las correcciones anteriores para el respectivo medidor. Se garantiza que la suma de caudales en entradas y salidas del crucero es igual (Ecuación 42)

EXPERIMENTO EN FÍSICO	ENTRADAS		SALIDAS	
	O	N	S	E
Presión (psi) =	16.45	16.45	16.20	16.05
Re =	188,567.0	112,033.5	112,514.9	188,085.6
Vel(m/s) =	1.876	1.115	1.120	1.872
Qcorr(lps) =	15.2125	9.0382	9.0771	15.1736
	SUMA Q ENT	24.2507 lps	SUMA Q SAL	24.2507 lps

4.1.2. Hidrodinámica en CFD

Se trabajó mediante el software COMSOL Mutiphysics®, versión 4.3b en una computadora con dos procesadores Intel® XeonTM 2.30 GHz, con 96 GB de RAM y un sistema operativo de 64-bits. Las simulaciones se realizaron en régimen estacionario para la obtención del vector de velocidades y en régimen no permanente para el proceso de transporte de especies diluidas, con una duración de 20s.

El análisis fue bajo la modelación de flujo turbulento en régimen estacionario, el cual consiste en la resolución aproximada de las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes (RANS por sus siglas en inglés) para flujo incompresible (46). En dichas ecuaciones, los esfuerzos de Reynolds pueden ser descritos en términos de viscosidad turbulenta μ_T (47) siguiendo el modelo de turbulencia k- ε (Veerstek & Malalasekera, 2007; Rosales et al., 2016).

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = -\nabla P + \nabla \cdot \left((\mu + \mu_T)(\nabla \cdot \mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T) \right) \quad (46)$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (47)$$

El modelo de turbulencia k- ε expresa estos esfuerzos en función de la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación de esta energía (ε), descritas como sigue:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (48)$$

$$\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{e1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{e2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (49)$$

Los parámetros adimensionales $C_\mu=0.09$, $C_{e1}=1.44$, $C_{e2}=1.92$, $\sigma_k=1$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ son constantes empíricas obtenidas para un amplio rango de flujos turbulentos. Las funciones de pared para describir las velocidades cuando se aproxima a las paredes del modelo se describen a continuación:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (50)$$

Donde u^+ es la componente de velocidad normalizada dentro de la capa logarítmica de la pared, κ es la constante de Von Karman (0.4187), E es una constante que depende de la rugosidad de la pared y y^+ es la distancia adimensional desde la pared.

4.1.2.1. Parámetros de entrada y condiciones de contorno

Los parámetros de entrada que se asignan a un ensayo en CFD, son las condiciones de frontera a la distancia de donde se registraron las velocidades y presiones, estableciéndolas de la siguiente forma:

- Velocidad de entrada en Norte
- Velocidad de entrada en Oeste
- Presión a la salida Este
- Presión a la salida Sur

Para valores a las entradas, se deben definir los parámetros k_0 y ε_0 los cuales se obtienen de las siguientes expresiones:

$$k_0 = \frac{3}{2}(U_0 I_T)^2 \quad (51)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}}}{L_T} \quad (52)$$

La intensidad turbulenta I_T varía entre 0.05 y 0.10. Para la Longitud de escala turbulenta, L_T se puede obtener para tuberías en función del radio r , obteniendo el 7% de éste. $L_T = 0.07r$ (Rosales et al., 2007).

4.1.2.2. Construcción geométrica del modelo

La construcción geométrica comprende básicamente las 4 tuberías entre las entradas y las salidas. Se tomaron las mismas longitudes que en el modelo experimental. Para su ensamble, se trazaron 2 cilindros con el diámetro de la tubería y la longitud comprendida por la tubería de entrada siguiendo su curso lineal a la tubería de salida, (1m+1.5m). A continuación se realiza una unión intersectada, esto es, que la geometría de intersección entre ambos cilindros sea un único cuerpo geométrico (Figura 21).

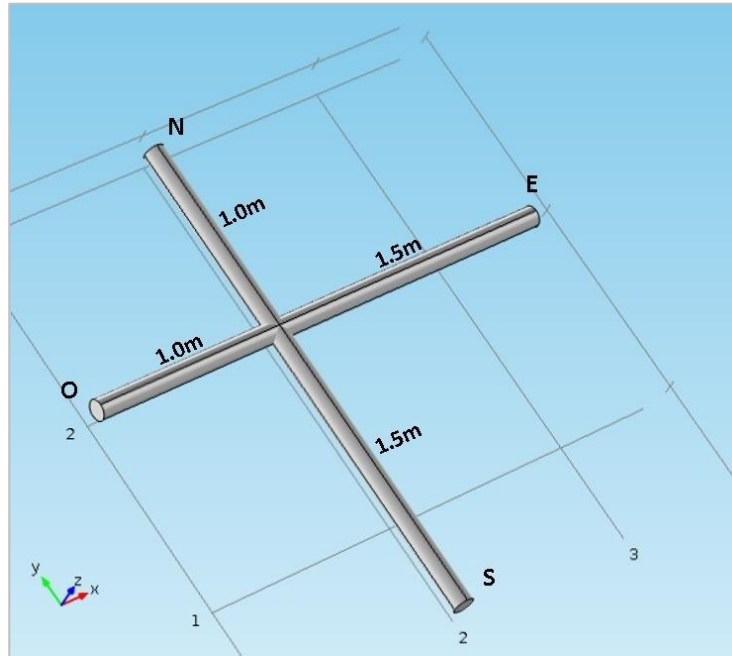


Figura 21. Primer trazo del cruceo utilizando dos cilindros de diámetro y longitudes correspondientes a las tuberías del cruceo experimental.

Como se mencionó en los puntos anteriores, para el control de velocidades se utilizaron válvulas de compuerta. El funcionamiento de una válvula es controlar el paso del caudal en una determinada sección transversal de la tubería, obstaculiza el paso del agua reduciendo su flujo. Entonces, para contemplar dicha compuerta, se prolongó el cilindro de la salida de la tubería donde se aplica la obstrucción por la válvula. Dicha obstrucción será interrupción de la tubería en el modelo, por lo que se traza una placa en una posición lejana y se realiza un corte. Se muestra un ejemplo para una salida en la siguiente figura:

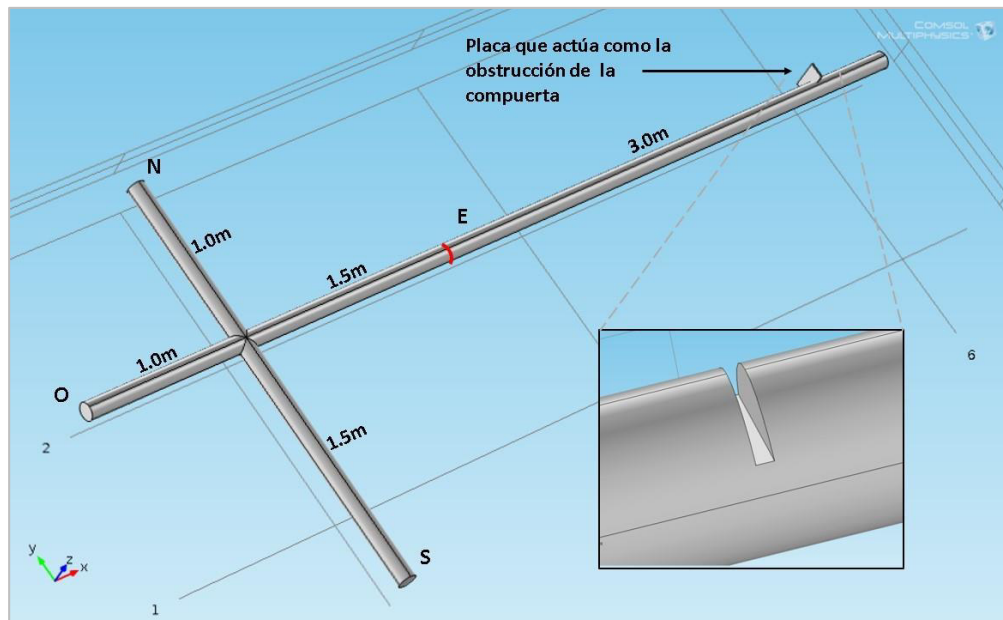


Figura 22. Posicionamiento de la obstrucción que fungirá como la compuerta de la válvula. Para el caso de la obstrucción en las dos salidas Este y Sur, se realiza lo mismo en ambas.

Las compuertas únicamente es necesario emplazarlas en las salidas, debido a que en las entradas se asigna un valor promediado de velocidad, el cual ya ha sido regulado por una válvula. Sin embargo, a las salidas el flujo apenas será obstaculizado para controlar su velocidad. La compuerta se coloca en un punto alejado de la frontera, con el fin de que esta obstrucción no genere zonas de turbulencia o zonas de recirculación que puedan afectar el curso turbulento estable y poder obtener un valor promediado de velocidad y presión de manera homogénea en la frontera.

Por último, hasta este punto el modelo es simétrico respecto un plano XY (siguiendo los ejes coordenados que se aprecian en las figuras de estos apartados) que se posicionen justo en el punto medio de la sección de la circunferencia de la tubería. Por lo anterior, el modelo puede ser dividido en dicho plano asignando un contorno de simetría en el corte. Con esto se permite disminuir la cantidad de elementos que conformen el mallado (se describirá a continuación) y con esto reducir la capacidad utilizada del procesador de la computadora y acortar los tiempos de simulación.

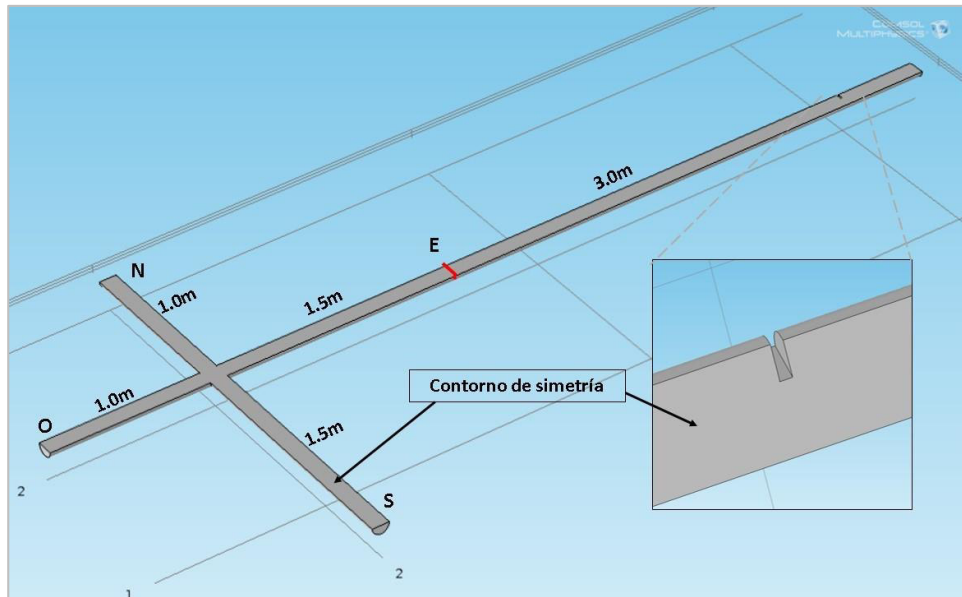


Figura 23. Eje de simetría y forma final de la geometría del modelo (para el caso de la utilización de una compuerta)

4.1.2.3. Selección de malla

El mallado es una parte fundamental en la simulación en CFD. El programa COMSOL, cuenta con definiciones de malla preliminares para los modelos en CFD. Dichas mallas varían en función de su grado de finura (en inglés, designan la palabra **Mesh** al número de pasos o hilos determinados con una unidad de longitud). Los grados de finura son los siguientes:

- Extremadamente grueso
- Extra grueso
- Más grueso
- Grueso
- Normal
- Fino
- Más fino
- Extra fino
- Extremadamente fino

Cuando se trabaja en el módulo de CFD, estos grados de malla se distribuyen de una manera uniforme en la mayor parte de la región del modelo a simular, dando un mayor grado de finura a las zonas

con mayor geometría irregular, en las cuales pudieran darse casos de turbulencia más marcada, recirculación, etc.

La mejor selección de malla repercute en una mayor precisión de la simulación llevada a cabo, pero también intervienen otros aspectos, como la memoria computacional. Aquella que sea de un grado más fino, requerirá mayor memoria y un uso elevado del procesador, por lo que aumentarán los tiempos de simulación "exponencialmente". Sin embargo, seleccionar la malla más fina no es indicador de la una precisión ventajosa, ya que se puede obtener una aproximación adecuada con menores grados de malla sin recurrir a la más elevada.

Para dicha selección, se comenzaron a simular dos escenarios, fijando la malla extremadamente gruesa, y se verifica la aproximación resultante respecto al escenario realizado en físico. Para lo anterior, se obtiene un valor de velocidad promedio en la frontera. En Comsol, estos valores se promedian en el contorno respectivo a la salida/entrada, obteniendo el área con la geometría de los elementos de la malla. Debido a los elementos que conforman la malla, no se contemplan formas circulares, si no totalmente poligonales, es natural que el área no corresponda totalmente a la estimada mediante alguna relación geométrica para circunferencia.

La selección de malla es una cuestión importante, ya que de ella dependerá la representación aproximada de la simulación del experimento, los tiempos necesarios de cómputo y capacidad de procesador.

4.2. MODELO DE TRANSPORTE DE SOLUTO

Es importante que el modelo hidrodinámico quede bien fundamentado, puesto que va a ser el medio en el que el soluto hace su transporte, puesto que es uno de los principales factores que describen su trazo a través de un modelo y con el cual se verificará cómo se dará la mezcla en el crucero.

4.2.1. Transporte experimental, método empleado

De igual manera, para el transporte de soluto, se realizarán ensayos del seguimiento de un trazador a través del agua en el crucero, el cuál se realizará mediante el trazador electroquímico de Sulfato de cobre ($CuSO_4$). Una buena caracterización de los procesos en simulación, se logra con la ayuda de las técnicas de estímulo-respuesta y en especial con la obtención de las curvas de Distribución de Tiempos de Residencia (Curvas DTR) (I. Rodríguez et al., 2001). La técnica de estímulo respuesta, utilizada en este trabajo se describió en el capítulo 1, en la sección 1.4. El proceso de inyección y detección se resume en la siguiente figura 24. La descripción de las propiedades del trazador, inyección, y electrodos para su medición, se describirán en los siguientes puntos.

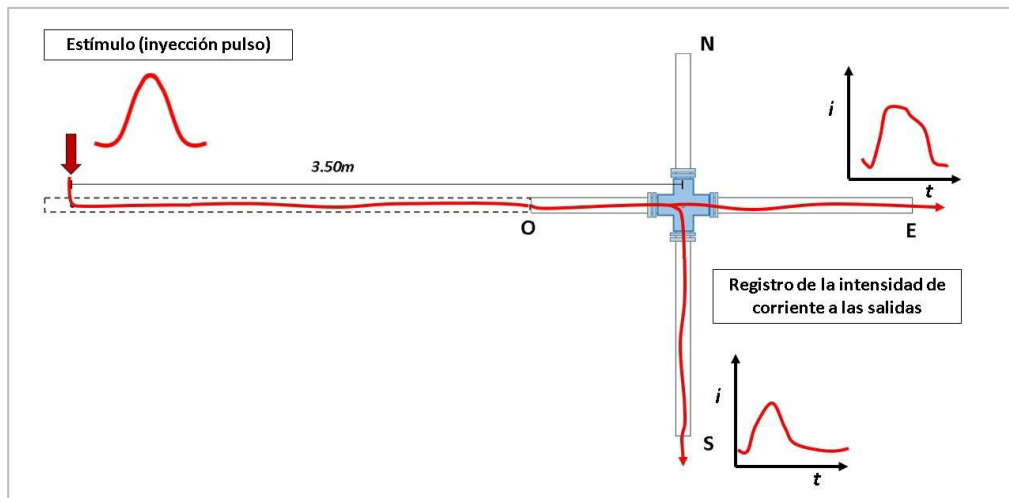


Figura 24. Técnica estímulo-respuesta para la obtención de curvas DTR.

4.2.1.1. Características del trazador

El trazador que se utilizó para las pruebas es sulfato cúprico pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) de grado normal, de marca Karal S.A. de C.V. Trazador electroquímico comúnmente utilizado para la obtención de curvas DTR en reactores para su validación en simulación CFD (Sandoval et al., 2016; Rosales, Pérez & Nava, 2015). El peso molecular es de 249.68 g/mol.

Se prepararon soluciones de concentración 0.25mol/L, las cuales se obtenían mediante la siguiente relación:

$$P = M \cdot PM \cdot Vol \quad (53)$$

Donde:

- P = Peso (gr) del trazador
- M = Concentración molar de la solución (mol/L)
- PM = Peso molecular del trazador (gr/mol)
- Vol = volumen (L) de agua destilada como disolvente

Despejando la Concentración molar (M) se determinan los parámetros necesarios de P y Vol para derivar soluciones 0.25mol/L, las cuales se prepararon utilizando 10L de agua destilada y 624.2gr de CuSO_4 .

Para definir esta concentración como apropiada para el experimento, se prepararon soluciones con menor concentración molar, 0.05, 0.1 y 0.2 y la 0.25mol/L. Realizando unas primeras lecturas con dichas concentraciones, las señales de respuesta tenían buena relación pico/área de una curva con las concentraciones de 0.2 y 0.25mol/L, siendo esta última la más apropiada. Una concentración más elevada

generaría una curva con un pico más elevado y resultarían datos más grandes, con lo que igualmente se utilizaría más cantidad de trazador, cuando las señales adecuadas se obtienen con menos cantidad de trazador.



Figura 25. Trazador Sulfato de Cobre utilizado para los ensayos en el crucero.

4.2.1.2. Inyección del trazador

Las presiones que se manejaron para los ensayos van desde los 0.41 hasta los 1.73 bar para cada tubería. Para vencer estas presiones y realizar la inyección se empleó un equipo de bombeo, el cual impulsa el trazador desde un recipiente graduado a la tubería.

Se utilizó una bomba hidráulica marca Siemens, de 1CP de potencia, motor monofásico, velocidad de rotor 3515-3535 rpm. Para el control de la inyección, la conexión a la entrada de la tubería se colocó una válvula de esfera de 1/2".



Figura 26. Inyección del trazador, vista lateral y frontal. El equipo de bombeo impulsa el trazador desde una probeta graduada hacia la tubería. El control se hace mediante una válvula de esfera.

La inyección del trazador se realiza en la entrada Oeste del crucero, situado el punto de inyección a 2.7 m antes de la frontera de entrada y 3.5m respecto al centro del crucero.

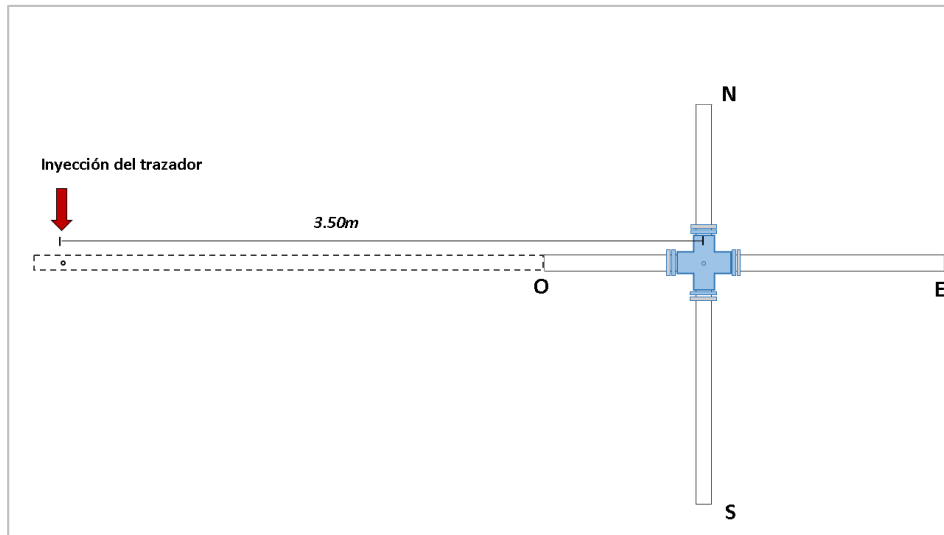


Figura 27. Punto de inyección del trazador en el cruceo.

4.2.1.3. Electrodo para la medición del trazador

Los electrodos se colocaron en las fronteras de salida de las tuberías, cercanos a los transductores de presión. Estos electrodos deben estar elaborados de un metal con propiedades adecuadas para conducción eléctrica. Se elaboraron con las siguientes características:

Material:	Cobre sólido (no hueco)
Diámetro de varilla:	4.4 mm
Longitud de varilla:	9.5 cm (abarca más del 90% del diámetro de la tubería del cruceo)
Distancia entre electrodos:	4.6 mm
Material de aislamiento:	resina

Los escenarios que se trabajaron presentan grandes valores de presión y velocidad. El grosor de las varillas de los electrodos soporta dichas velocidades y presiones, evitando deformaciones y tienen un área adecuada para el intercambio de iones de cobre para el proceso de respuesta.



Figura 28. Electrodos manufacturados para la respuesta electroquímica. Se muestra un electrodo antes de realizar una prueba (lado derecho) y uno después de realizar la prueba. La adhesión del cobre se aprecia en el electrodo derecho.

4.2.1.4. Equipo para detección de señal eléctrica

Se utilizó un potenciostato-galvanostato, marca BIOLOGIC, modelo SP-150. Este equipo aplica un potencial eléctrico con el cuál ocurrirá la adhesión el cobre en las varillas de los electrodos. Cuenta con un software que permite el registro de la intensidad de corriente a periodos fijos de tiempo.

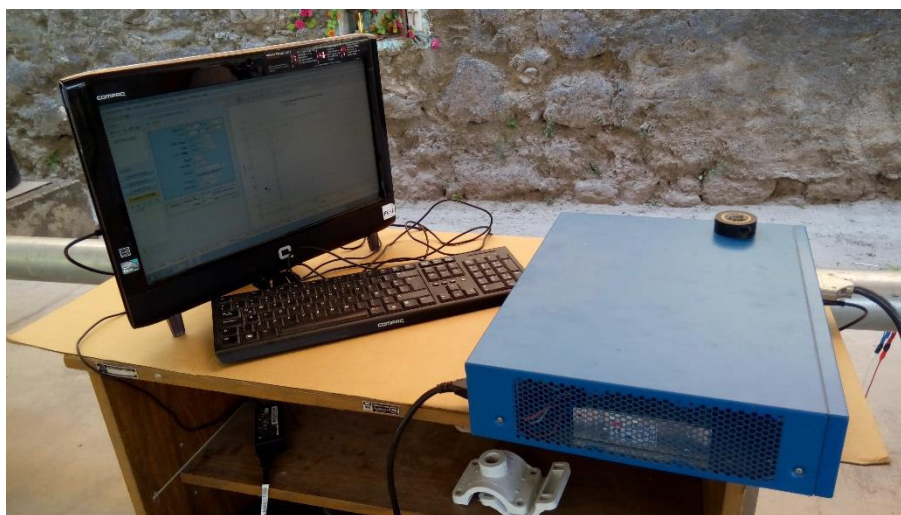


Figura 29. Equipo utilizado para la obtención de las curvas de intensidad de corriente eléctrica.

Se muestra una foto del ensamble del crucero y los dispositivos de medición



Figura 30. Montaje de dispositivos de medición, inyección y detección en el crucero experimental.

4.2.1.5. Transporte de soluto en CFD y Distribución de Tiempos de Residencia (DTR)

Para describir la curva de distribución de tiempos de residencia (DTR) en un fluido para una solución diluida en régimen transitorio, se emplea una ecuación de convección-difusión promediada para flujo turbulento (53).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla C + \nabla \cdot (D + D_T) \nabla C \quad (53)$$

Donde \mathbf{u} es el vector de velocidades determinado de la ecuación (46) del análisis hidrodinámico, C es la concentración del trazador, D es el coeficiente de difusión del trazador. Bajo condiciones de flujo turbulento, la concentración y los parámetros de fluctuación pueden ser agrupados en un término de

difusión turbulenta, D_T . Este término puede ser evaluado considerando el Número de Schmidt (turbulento), Sc_T , para el cual, se empleó la ecuación propuesta por Kays-Crawford (1997):

$$Sc_T = \frac{\mu_T}{(\rho D_T)} \quad (54)$$

$$Sc_T = \frac{1}{\frac{1}{2Sc_{T\infty}} + \frac{0.3\mu_T}{\sqrt{Sc_{T\infty}\rho D}} - \left(0.3\frac{\mu_T}{\rho D}\right)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{\rho D}{0.3\mu_T\sqrt{Sc_{T\infty}}}\right)\right)} \quad (55)$$

Donde $Sc_{T\infty}$ es el valor de Sc_T a una distancia lejana de la pared y se fija con un valor $Sc_{T\infty} = 0.85$. Se considera mezcla perfecta en la frontera de entrada de trazador debido a la distancia con la que se inyecta. La curva de distribución de tiempos de residencia se estima mediante la ecuación (56) y describe la distribución del trazador a ciertos periodos de tiempo desde la inyección del trazador hasta el punto de contacto con los electrodos.

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t)dt} \quad (56)$$

Donde $C(t)$ es la concentración dependiente del tiempo. El desarrollo de las curvas de distribución de tiempos de residencia se realizó tomando $C(t)$ de la ecuación (53).

4.3. ESCENARIOS DEL TRANSPORTE DE SOLUTO

El análisis propuesto de la mezcla en cruceros se realizará mediante un modelo en CFD. Este modelo debe estar validado experimentalmente para poder tener confiabilidad en que las representaciones de simulación regresen resultados que describan las condiciones que se presenten en la realidad.

Entonces la descripción de los escenarios consistirá en dos principales puntos: **La validación del modelo** y los **escenarios propuestos mediante CFD para el análisis de la mezcla en cruceros**.

4.3.1. Validación del modelo CFD

Para la validación del modelo en CFD, se prepararon escenarios que describirán el flujo de fluido y el seguimiento del trazador en el CFD. Para ello, se describirán 4 escenarios en el crucero experimental en físico en donde se analizará su aproximación representada en CFD. Todo esto tanto en el modelado hidrodinámico como en el modelado de transporte de soluto.

4.3.1.1. Desarrollo de una prueba en el dispositivo experimental

En cada prueba se realizan los siguientes pasos:

1. Se pone en marcha la bomba hidráulica (15HP) que alimenta al crucero con agua y se espera hasta que sus flujos se estabilicen, asegurando el régimen estacionario.
2. Se toman lecturas de caudal y presión en cada frontera, verificando que dichos valores se mantengan lo más invariable posible
3. Se aplica un potencial eléctrico con el potencióstato/galvanostato a los electrodos esperando, de igual manera, a que la señal recibida sea estable. Al mismo tiempo, se arranca la bomba que impulsa el trazador sin realizar inyección (la válvula se encuentra cerrada)
4. Una vez que la señal del potencióstato/galvanostato está fija, se inicia el registrador y se manipula la válvula del trazador para inyectar un volumen definido de la solución asemejando un pulso (se abre paulatinamente y se cierra hasta que el volumen establecido se haya introducido al crucero)
5. Se registra la señal de intensidad de corriente que se produjo en una curva por la interacción del cobre en los electrodos, con el software del potencióstato/galvanostato
6. Se detiene la bomba del trazador y la bomba de agua, se retiran los electrodos para lijar sus celdas perfectamente y se colocan de nuevo para realizar la siguiente prueba

Debido a que el potencióstato/galvanostato sólo tiene un canal de recepción, cada prueba se repite dos veces para cada salida del crucero. Esto es, se realizan dos pruebas para la salida Este y dos pruebas para la salida Sur. Todas las pruebas antes mencionadas se ejecutan en condiciones análogas de hidrodinámica y también del pulso de trazador inyectado (volumen y tiempo de inyección). Si los resultados de intensidad de señal son muy próximos (que la curva generada no difiera en un 5% de área), se toma la prueba como efectiva y servirá para el análisis de las simulaciones en CFD.

4.3.1.2. Escenarios propuestos para validación del modelo

Se definieron los siguientes 4 escenarios en el crucero experimental para su representación en CFD y con ello, estudiar los resultados para la validación del modelo. Se presentan en la siguiente tabla las lecturas de velocidad y presión que se registraron en cada frontera. El pulso inyectado es la intrusión de un volumen fijo de la solución del trazador al crucero, controlado por la apretura/cerradura de la válvula de esfera.

Los parámetros de entrada para los escenarios serán los mostrados en la tabla 11 y servirán para validar la representación en CFD, mediante la hidrodinámica (valores de presión y caudal) y el transporte de soluto (curvas DTR).

Tabla 11. Lectura de datos de los 4 escenarios que servirán para la validación del modelo CFD.

		V1		V2		V3		V4	
		velocidad (m/s)	Presión (bar)	velocidad (m/s)	Presión (bar)	velocidad (m/s)	Presión (bar)	velocidad (m/s)	Presión (bar)
Entradas	Norte	0.8083	1.5700	1.1161	1.6000	0.6722	1.9600	1.1115	1.8800
	Oeste	1.5334	1.5600	1.2694	1.6000	0.9892	1.9600	1.0593	1.8800
Salidas	Este	1.0399	1.5600	1.0620	1.5600	1.2463	1.9600	1.0046	1.8800
	Sur	1.3019	1.5600	1.3235	1.5600	0.4266	1.9600	1.1668	1.8800
Pulso	(ml)	150		150		150		150	

4.3.2. Escenarios para el análisis de la mezcla en cruceros mediante CFD

Los flujos que se presentan en cruceros pueden tomar diferentes alternativas:

- 1 Entrada, 3 salidas
- **2 entradas, 2 salidas**
- 3 entradas, 1 salida

La primera alternativa no requiere un análisis de distribución de concentraciones a las salidas, puesto que el fluido se distribuye equitativamente al no existir una mezcla proveniente de dos o más flujos. La segunda alternativa es en la que se centra este estudio, se propondrán escenarios que abarquen las combinaciones de velocidad que pudieran darse a valores de presión promedio presentes en redes de agua potable. En el caso de la alternativa 3, los caudales de los provenientes 3 flujos, de igual o diferente concentración, sí realizan una mezcla uniforme al juntarse y fluir en una única salida. Como se mencionó en el estado del arte, dos autores de la revisión bibliográfica concluyeron que la mezcla ocurrida en esta alternativa si es muy próxima al cálculo de la mezcla completa.

Las variantes de velocidad para el caso de dos entradas y dos salidas se describen en la figura 31. Obtener velocidades iguales resulta complicado trabajando estas magnitudes de velocidad y presión. Por tanto, los escenarios se aproximaron en lo posible para abarcar las 4 combinaciones de velocidades de la figura 31. Se ha determinado considerar que las velocidades son aproximadas cuando estas varían en un porcentaje con una diferencia relativa menor al 20%, las variaciones que se presentan con una diferencia relativa de 20% o mayor se considera que las velocidades son diferentes.

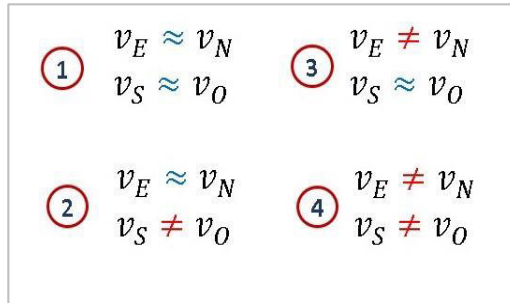


Figura 31. Combinaciones de velocidades que pueden ocurrir en cruceros. Estas alternativas corresponden al caso en el que existan dos entradas y dos salidas, llamándose v_E , v_O a las entradas Norte y Oeste respectivamente. De igual forma, v_E y v_S corresponden a las velocidades de las salidas Este y Sur respectivamente.

En las redes de agua potable, debido a la diversidad de demandas, presiones, diámetros, cotas de nodos, materiales, etc., no es muy probable encontrar flujos de igual magnitud para entradas o salidas. Sin embargo, es importante considerar estas opciones para encontrar un análisis más completo de la mezcla en cruceros. Por lo tanto, las condiciones más probables de encontrar en redes de agua potable son del grupo 4 de la figura 31 anterior, en donde las velocidades en cada frontera son desiguales.

Una vez que el modelo CFD haya sido validado, se realizarán combinaciones de los parámetros de entrada en los cruceros. Se propusieron un total de 12 escenarios, los cuales abarcan los cuatro grupos de velocidades de entradas y salidas que se describieron en la figura 31. Los escenarios se describen a continuación:

Tabla 12. Valores de velocidad y presión de los 12 escenarios propuestos para el análisis de la mezcla en cruceros.

		P1		P2		P3		P4		P5		P6	
		vel (m/s)	Pre (bar)	vel (m/s)	Pre (bar)	vel (m/s)	Pre (bar)	vel (m/s)	Pre (bar)	vel (m/s)	Pre (bar)	vel (m/s)	Pre (bar)
ENT	Norte	1.1161	1.60	0.9300	0.90	1.1261	1.92	1.1115	1.88	1.1775	1.60	1.4117	1.72
	Oeste	1.2694	1.60	1.0544	0.90	1.0375	1.91	1.0593	1.88	1.2244	1.60	0.8162	1.72
SAL	Este	1.0620	1.56	1.0252	0.90	1.2007	1.91	1.0046	1.88	1.0723	1.60	1.1069	1.72
	Sur	1.3235	1.56	0.9593	0.90	0.9629	1.91	1.1668	1.88	1.3296	1.60	1.1222	1.72

		P7		P8		P9		P10		P11		P12	
		vel (m/s)	Pre (bar)	vel (m/s)	Pre (bar)	vel (m/s)	Pre (bar)	vel (m/s)	Pre (bar)	vel (m/s)	Pre (bar)	Vel (m/s)	Pre (bar)
ENT	Norte	0.8083	1.57	1.3421	8.60	1.0688	1.60	2.2304	0.66	0.6722	1.96	1.7126	0.32
	Oeste	1.5334	1.56	2.0572	8.55	1.2559	1.60	1.3271	0.66	0.9892	1.96	2.0595	0.32
SAL	Este	1.0399	1.56	1.1358	8.30	0.9936	1.60	1.0800	0.63	1.2463	1.96	1.9742	0.28
	Sur	1.3019	1.56	2.2635	7.65	1.3311	1.56	2.4775	0.62	0.4266	1.96	1.7979	0.29

Los escenarios fueron obtenidos experimentalmente mediante la manipulación de válvulas de compuerta, con las que se variaban las velocidades en sus fronteras. Entonces, los escenarios están generados de tal manera que los escenarios donde las fronteras tanto de entrada como de salida, presenten una diferencia relativa menor al 20% tendrán valores de velocidad semejantes en entradas y salidas (grupo 1). Cuando se presente una diferencia relativa mayor o igual al 20%, se van variando velocidades de entrada y salida en cada prueba hasta que sus valores impliquen ser desiguales en todas las fronteras (grupo 4).

Los 12 escenarios anteriores comprenden los 4 grupos de velocidades descritos en la figura 31. se enlista su correspondencia a continuación:

- Grupo 1: P2 y P4
- Grupo 2: P1, P3, P5 y P9
- Grupo 3: P6 y P12
- Grupo 4: P7, P8, P10 y P11.

4.3.2.1. Coeficiente E de concentraciones a las entradas y coeficiente S a las salidas

El análisis de la mezcla no sólo depende de las velocidades de los fluidos, sino también de la concentración que lleven los flujos a las entradas. Para las simulaciones en CFD, en cada escenario propuesto de la tabla 12, las concentraciones se variarán a las entradas de acuerdo a la tabla 13.

La concentración a la entrada Oeste se mantendrá fija, con un valor de 0.25 mol/L (=25mol/m³), tal y como fue realizado en las pruebas experimentales. La concentración que se hará variar será la de la entrada Norte. Sus valores se describen en la siguiente tabla 13.

Tabla 13. Variación de concentración (mol/m³) a la entrada Norte para escenarios.

C_{norte}	0	62.5	125	187.5	250	312.5	375	437.5	500
C_{oeste}	250	250	250	250	250	250	250	250	250
E	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00

El valor de E corresponde a una relación que se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$E = \frac{C_{Norte}}{C_{Oeste}} \quad (57)$$

Donde:

- C_{Norte}, C_{Oeste} = Concentración a la entrada Norte y Oeste respectivamente

El rango de este coeficiente E va de 0.00 a 2.00, lo que representa la variación de las concentraciones desde que en una entrada se tienen un valor nulo y la otra no nulo, hasta que la relación de concentración en una entrada y la otra sea el doble.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y COMPARATIVAS

5. RESULTADOS Y COMPARATIVAS

En este capítulo se muestran los resultados de la validación del modelo CFD analizando su grado de aproximación para representar los escenarios realizados experimentalmente. También se presenta un análisis de sensibilidad para la determinación del grado de malla a utilizar para el modelo CFD. Más adelante se describirá que el modelo no es variable en gran proporción a modificar la difusión turbulenta del trazador y esto no repercute aún más en su aproximación a lo experimental. Una vez verificado que la simulación describe el proceso de transporte de fluido de una manera adecuada, se mostrarán los resultados del análisis de la mezcla en cruceros mediante los 12 escenarios propuestos. A su vez, se cuantifica el grado de distribución que se lleva a cabo en el crucero, comprobando si se trata de una mezcla completa o incompleta.

5.1. VALIDACIÓN DEL MODELO CFD

5.1.1. Validación hidrodinámica

5.1.1.1. Ajuste en la continuidad mediante aforo y vertedor triangular

Los errores para los caudalímetros en las entradas del crucero se estimaron mediante pruebas de aforo volumétrico. Se realizaron un total de 6 sesiones de estimación de errores, en cada sesión se regulaba el gasto a aproximadamente 25, 20, 15, y 10LPS, obteniendo un error para cada caudal. En los puntos 4.1.1.5. y 4.1.1.6. del capítulo 4 se mostraron ejemplos de la realización de pruebas de aforo. Para todas las sesiones se obtuvo un promedio general para cada gasto obtenido.

Tabla 14. Estimación de error en caudalímetros de entrada diferentes caudales. Este es el resultado de la promediación de las 6 sesiones de prueba.

		Gastos (LPS)	25	20	15	10
ERRORES (%)	Electromagnético		0.283	0.207	0.213	0.233
	Propela		6.455	5.638	5.711	6.004

El error de medición con el medidor electromagnético en todas las pruebas y sesiones fue poco (promedio general: 0.234%), mientras que el medidor de propela en todos los casos alcanzaba un valor mayor (promedio general 5.952%). Se recuerda al lector que el medidor electromagnético mide el caudal de las dos entradas, Norte y Oeste, juntas y el medidor de propela únicamente mide el caudal de la entrada

Norte. Debido a la aproximación que se tuvo mediante la validación de aforo volumétrico, se define al medidor electromagnético como la medición confiable para la entrada general de caudal al cruce. Entonces la corrección se realiza en cada lectura del medidor de propela (entrada Norte) aplicando la fórmula (45) descrita en el punto 4.1.1.6. del capítulo 4 debido a que tiene un error más elevado.

De la misma manera, se obtuvieron los errores para los medidores electromagnéticos de la salida Este, mediante validación con la formulación para vertedores propuestas en Sotelo (1991), se obtuvo un **valor general de 5.7469%**. Este error se aplicará al caudal medido mediante los medidores electromagnéticos empleados para la salida Sur.

5.1.1.2. Selección de malla y análisis de sensibilidad

Se presenta a continuación los gráficos, números de elementos (total de tetraedros, pirámides y prismas de los que está compuesta la geometría del modelo), el volumen comprendido por grado de finura y tiempo de simulación que se lleva a cabo en cada una de la lista de mallas predefinidas por COMSOL para simulaciones de flujo de fluido en régimen turbulento para el modelo $k - \epsilon$, mencionada en el punto 4.1.2.2.

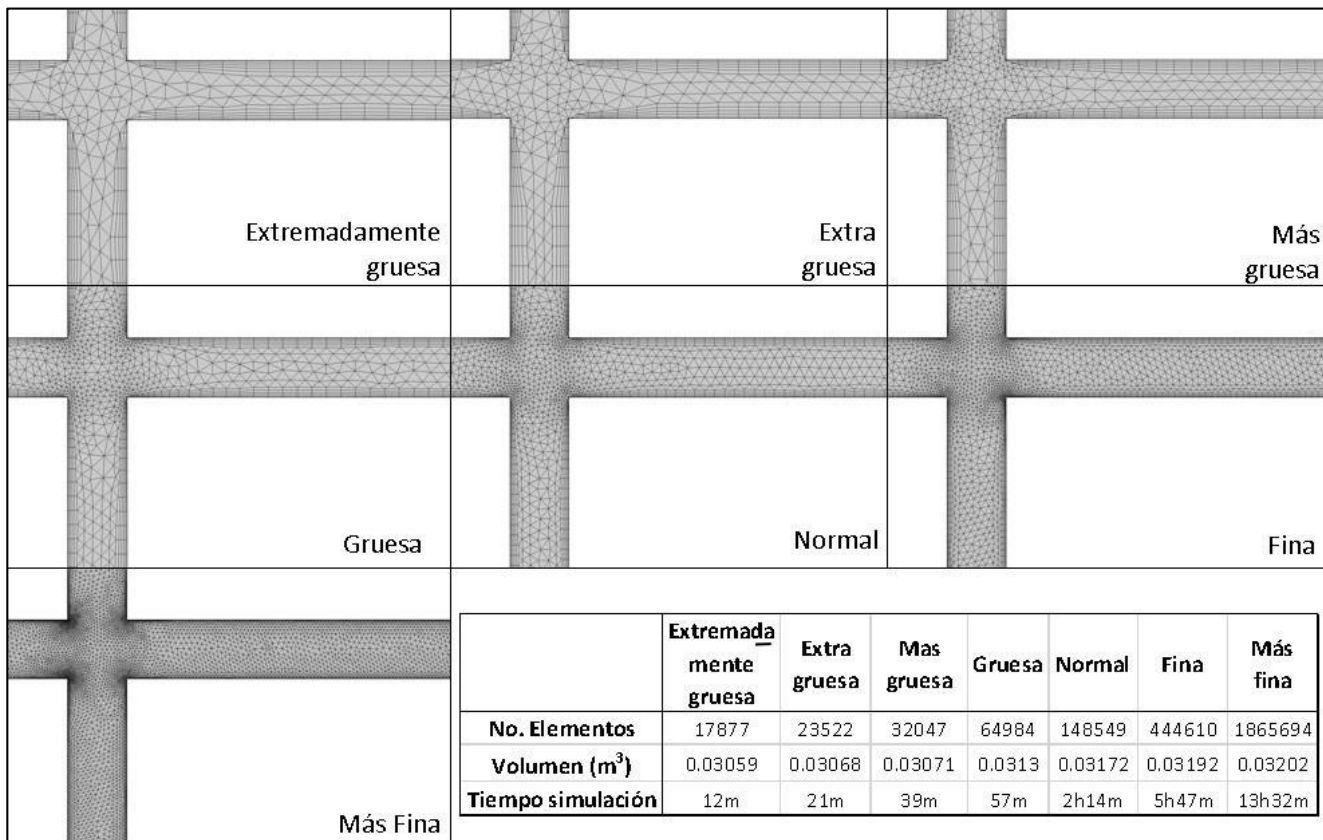


Figura 32. Comparativa del grado de finura de malla, los elementos que la componen y el tiempo de simulación promedio.

La malla seleccionada fue la de grado "Fino". El conjunto de los elementos de esta malla tiene una buena aproximación con el volumen estimado por el programa de dibujo asistido por computadora, AutoCAD, versión 2015. En el cual se realizó el trazo del cruce con resultando un volumen de 0.03228m^3 . Aunque el grado "Más Fino" se acerca aún más, requiere de un uso elevado del procesador de la computadora utilizada, repercutiendo en los tiempos de simulación, los cuales difieren a más del doble del tiempo promedio utilizado al grado anterior "Fino".

Los resultados del análisis de sensibilidad, en función del número de elementos versus estabilización de velocidad a las salidas (velocidades que obtiene CFD), verifican que el grado de malla resulta adecuado para estimar los valores de caudal. En el gráfico de la figura 33 se muestra la relación de velocidades de las salidas Este y Sur de la prueba P4. Para los grados de malla gruesos (extremely coarse, extra coarser, coarser, coarse y normal) la velocidad está teniendo una variación para ambas salidas. Sin embargo, a partir de l grado de finura FINE, las velocidades se ajustan y aumentando el grado de finura, ya no hay ningún cambio significativo. Por tanto, el grado de malla adecuado para las simulaciones es el FINE, con 444610 elementos en su malla. Aunque se muestra un solo caso de análisis de sensibilidad, no es necesario realizar uno para cada escenario, puesto que la geometría del modelo varía insignificativamente (cuestión de milímetros únicamente en los cierres de las compuertas).

Dichos valores se calculan utilizando el área de la frontera de entrada/salida del modelo. Por tanto, entre más fina sea su malla, tendrá un área más cercana a la geometría real, determinada por una circunferencia. Entre mallas más gruesas, el área tiene gran diferencia respecto aquella calculada con circunferencia (más del 11% de diferencia para mallas gruesas). Sin embargo, el área compuesta por los elementos de malla para el grado "fino" (0.611% de diferencia respecto a la real) y el grado "más fino" (0.531% de diferencia respecto a la real) no es muy considerable entre uno y otro.

Análisis de sensibilidad de malla

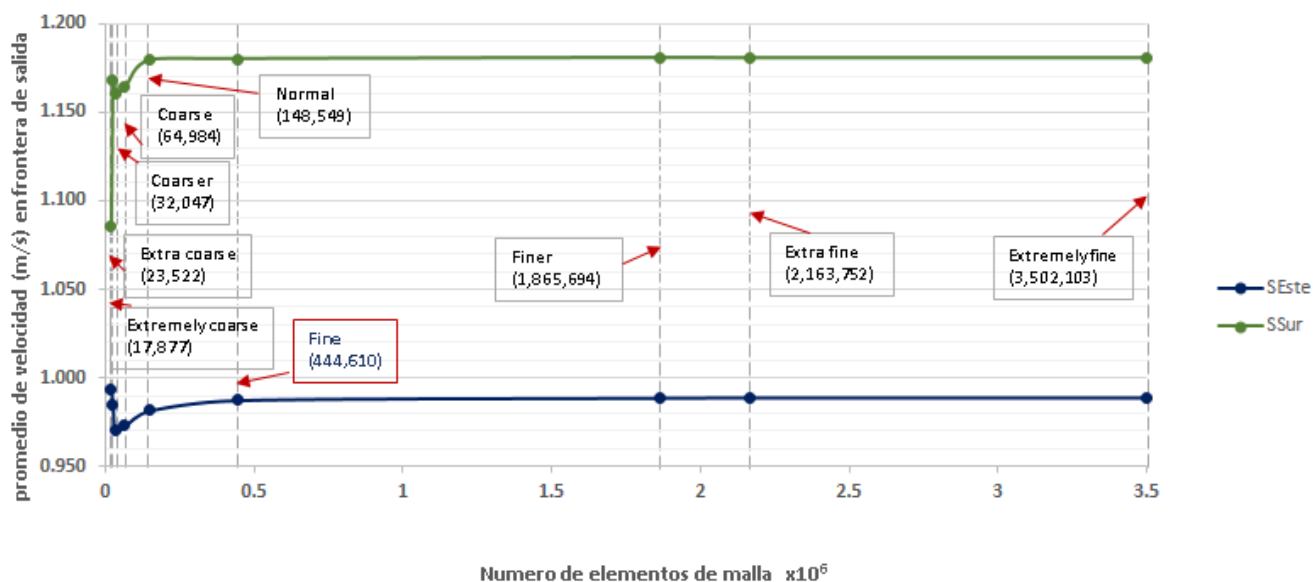


Figura 33. Análisis de sensibilidad de malla correspondiente a los resultados de velocidad de salida, en las fronteras Este y Sur, para la prueba de validación V4.

Otra consideración para la selección de malla fue el valor de y^+ , considerado para la fórmula (50) de las condiciones de contorno utilizadas para el modelo $k-\varepsilon$ (punto 4.1.2.1.). Este valor es importante verificar, ya que será la proximidad hacia la región logarítmica de la capa límite de la tubería. El valor de y^+ en esta región, según Malalasekera (1991), debe ser por lo menos $y^+ = 11.1$. Obteniendo los valores máximos y mínimos de la simulación en el entorno geométrico del mallado en COMSOL, este valor es alcanzado como valor mínimo desde la malla "fina", asegurando que las regiones con elementos de mallado mínimo valga 11.1 para y^+ . Aunque dicho valor, naturalmente se encuentra también en la malla "más fina", por los puntos antes mencionados, es una suficiente y adecuada aproximación la simulación con malla "Fina", además de un conveniente tiempo de simulación.

5.1.1.3. Aproximación hidrodinámica.

El principal objetivo de la solución de las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes, para este trabajo, es la obtención del campo de velocidades y los valores de presión que se den en el cruce. Por tanto, los parámetros iniciales de simulación, deben comprender velocidades y presiones en sus fronteras. En todos los escenarios que se llevaron a cabo (4 de validación y 12 de análisis de mezcla) se introdujeron velocidades uniformemente distribuidas en las fronteras de entrada de modelo (Norte y Oeste) y para las fronteras (Este y Sur) se asignaron presiones.

Para validar la representación hidrodinámica del modelo CFD, se verificará que los resultados en las fronteras correspondan a las lecturas tomadas experimentalmente. Esto es, que si se introdujo velocidad en las entradas y presión a las salidas, entonces CFD regresará los resultados simulados de presión a las entradas y velocidad a las salidas. Los resultados y sus porcentajes de aproximación respecto a las lecturas registradas experimentalmente son las siguientes:

Tabla 15. Resultados de la simulación en CFD de las pruebas de validación V1-4. %dif. Representa el error porcentual de diferencia entre el valor medido y el valor simulado, todo respecto al medido.

		V1			V2			V3			V4		
		MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.
Presión (bar)	Norte	1.57	1.5779	0.502%	1.60	1.5770	1.437%	1.96	1.9713	0.575%	1.88	1.8926	0.670%
	Oeste	1.56	1.5753	0.982%	1.60	1.5764	1.478%	1.96	1.9709	0.557%	1.88	1.8927	0.677%
Vel (m/s)	Este	1.0399	1.0438	0.381%	1.0620	1.0598	0.211%	1.2463	1.2371	0.744%	1.0046	0.9874	1.720%
	Sur	1.3019	1.2941	0.593%	1.3235	1.3217	0.133%	0.4266	0.4215	1.192%	1.1668	1.1800	1.130%

En la tabla anterior se puede verificar que la aproximación entre las lecturas experimentales y los resultados en CFD tiene una proximidad significativa. Para valores de velocidad, el error promedio es de 0.76% y el valor máximo llega a 1.72%. Los errores en cuanto a la presión son en promedio de 0.80% en la frontera norte y 0.92% en la frontera Oeste. En parte esta diferencia que se presenta, tendrá que ver con los decimales con que se registraron las lecturas. Los valores en CFD cuentan con 16 decimales de punto flotante, mientras que el osciloscopio utilizado registra un valor promediado de señal, en un tiempo determinado, con 2 decimales.

Los valores de velocidad que se obtienen en CFD corresponden a vectores de un campo de velocidad resuelto en las ecuaciones de Navier Stokes para flujo turbulento (modelo k-ε). Sin embargo, para obtener un valor promedio, COMSOL puede estimar promediaciones en un área específica. La malla seleccionada (grado fino) aproximaba el área de un corte de la tubería con buena aproximación (0.641% respecto a la geometría real obtenida por una circunferencia).

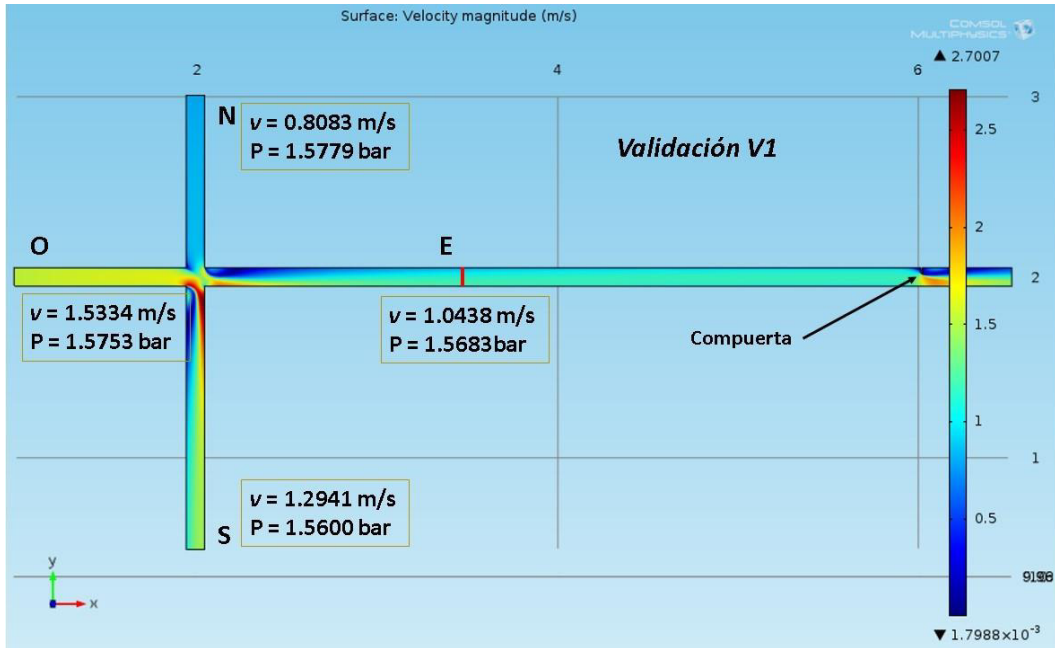


Figura 34. Gráfico de velocidades del modelo de validación V1 (tabla 15). La frontera Este, de longitud 1.5m respecto al centro del cruceo, es donde se realiza el corte para la estimación de la velocidad promedio.

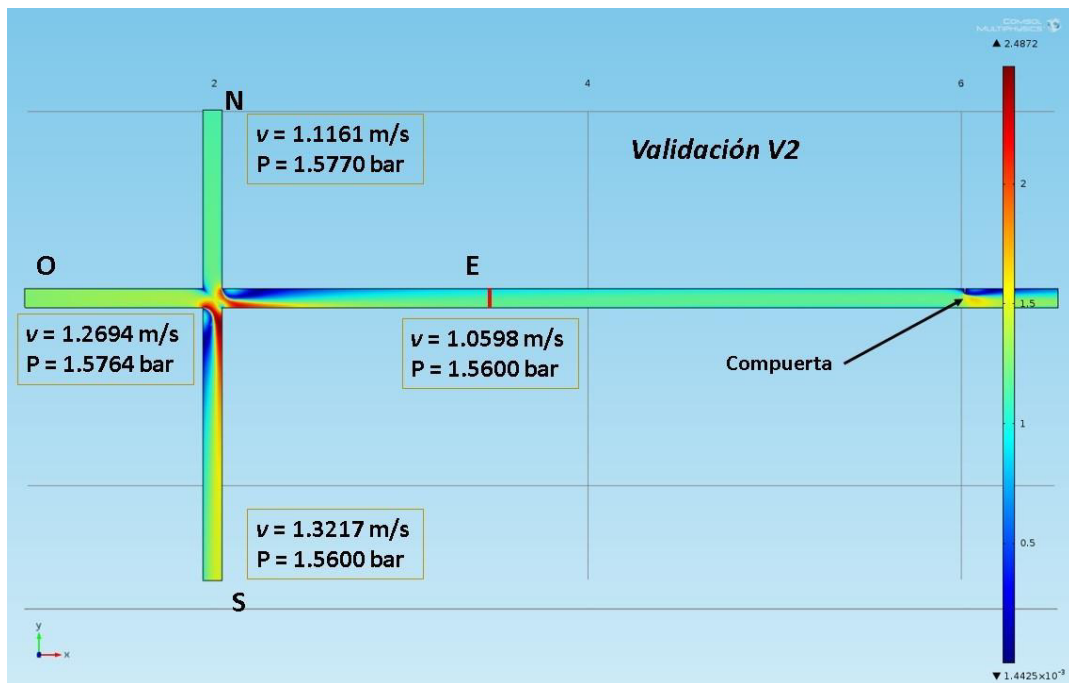


Figura 35. Gráfico de velocidades del modelo de validación V2 (tabla 15). La frontera Este, de longitud 1.5m respecto al centro del cruceo, es donde se realiza el corte para la estimación de la velocidad promedio.

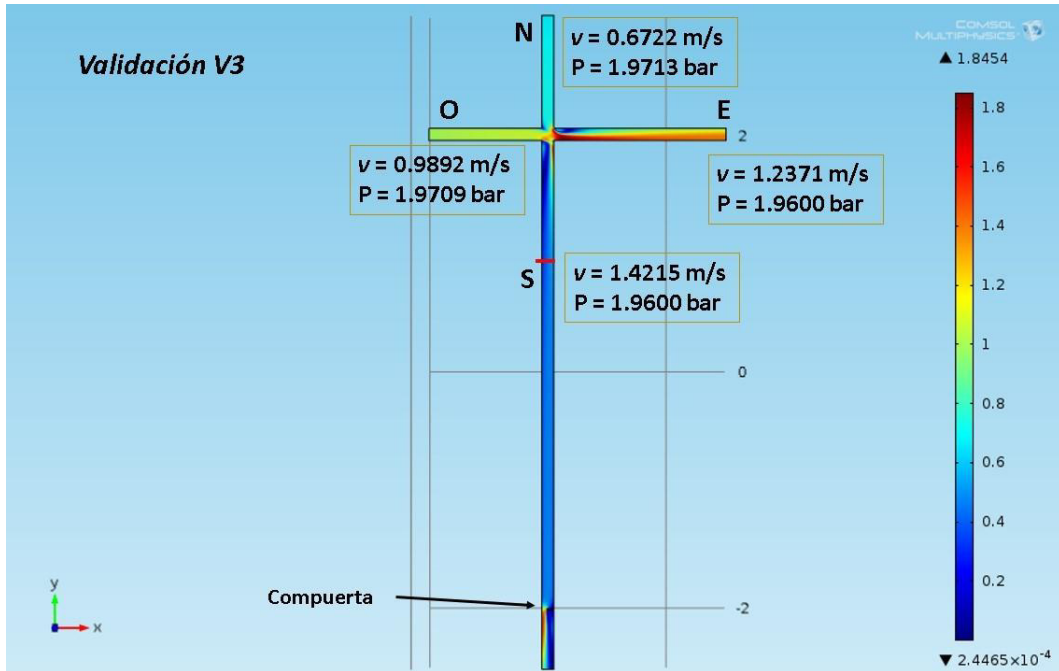


Figura 36. Gráfico de velocidades del modelo de validación V3 (tabla 15). En este caso, la frontera Sur, de longitud 1.5m respecto al centro del cruce, es donde se realiza el corte para la estimación de la velocidad promedio.

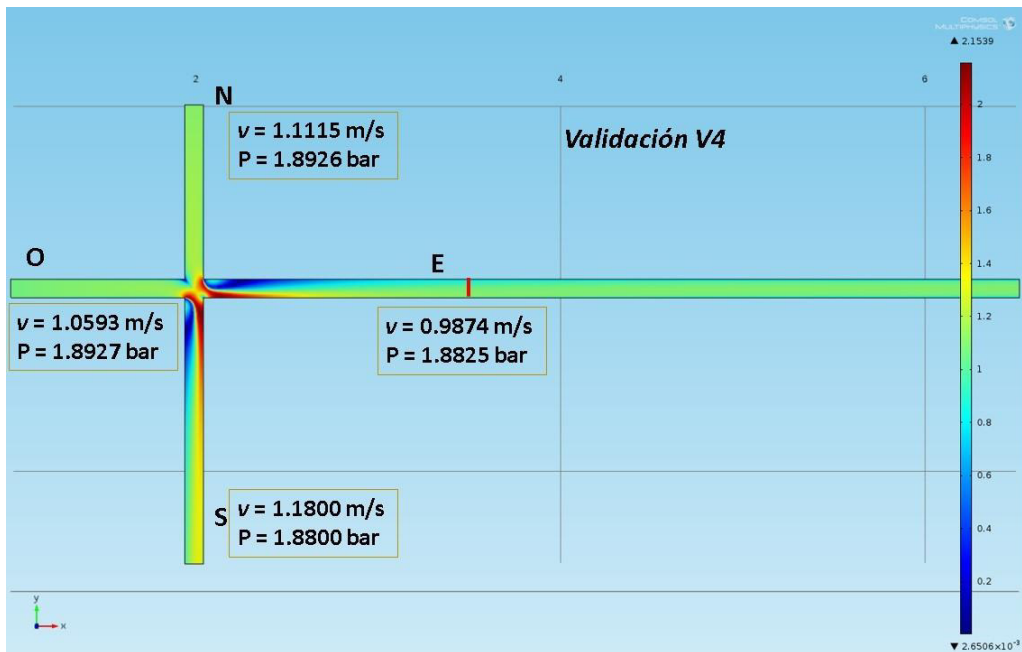


Figura 37. Gráfico de velocidades del modelo de validación V4 (tabla 15). La frontera Este, de longitud 1.5m respecto al centro del cruce, es donde se realiza el corte para la estimación de la velocidad promedio.

En las figuras 34-37 se aprecia que las velocidades en las fronteras donde se prolongó la tubería para implantar una compuerta al final de la misma, se comienzan a uniformizar los flujos. Lo cual también se puede verificar en la figura 38, en la que se muestra el contorno de una frontera con una expresión de color aproximadamente uniforme en el semicírculo. La variación de velocidades en estos cortes a las salidas de longitud 1.5m es muy poca. Por tanto, el promediado obtiene una velocidad intermedia de un rango muy corto, por lo cual se considera suficiente esta longitud de tubería para estimar la velocidad y presión. Además de que no se recurre a longitudes más largas que requieren mayor cantidad de elementos de malla y repercuta en los tiempos de simulación del modelo.

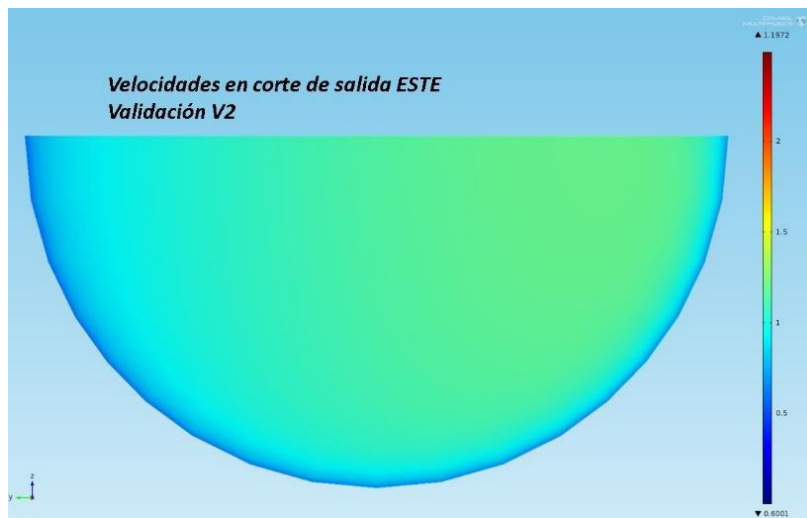


Figura 38. Ejemplo de corte en la prolongación de la tubería en la salida Este de longitud 1.5m.

5.1.2. Validación de transporte de soluto

5.1.2.1. Procesamiento de curvas de estímulo-respuesta

Para cada prueba de validación, se obtuvieron las curvas de la técnica estímulos-respuesta mediante el registro del software del galvanostato/potenciostato. Estas curvas muestran el valor de intensidad de corriente (*miliAmperes*) registrada en el tiempo, la cual varía por el intercambio de iones de cobre en las celdas de los electrodos. Las pruebas se realizaron en un total de 300 segundos. Si bien se muestra en la siguiente figura un gráfico obtenido para la prueba V4, es importante destacar que dicha curva mantiene un valor constante la mayor parte del tiempo, la cual es la estabilización de la señal recibida dado el potencial suministrado.

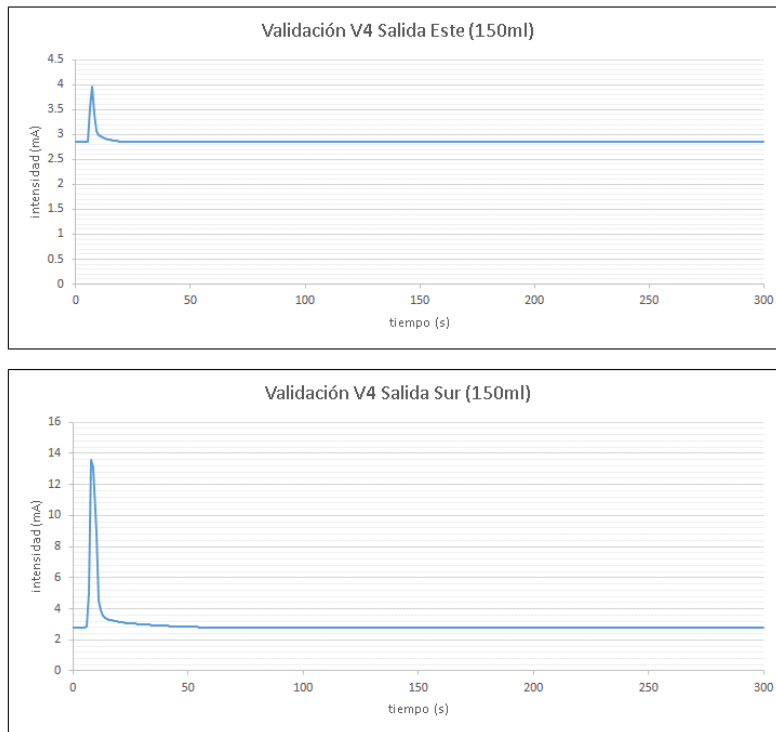


Figura 39. Registro de intensidad eléctrica mediante el potencióstato para una la prueba V4 de validación.

De aquí se discretizan los datos de la siguiente manera:

- Se divide la curva entre el valor mínimo (el valor de la señal cuando se estabiliza) para que el valor mínimo de la curva sea cero.
- Se recorta en el tiempo a los primeros 20 segundos, en los que se observa en todas las pruebas que la curva se genera dentro de este lapso de tiempo, el resto es la señal en su valor mínimo.
- Se hace un spline mediante un software para suavizar los picos registrados cada segundo.

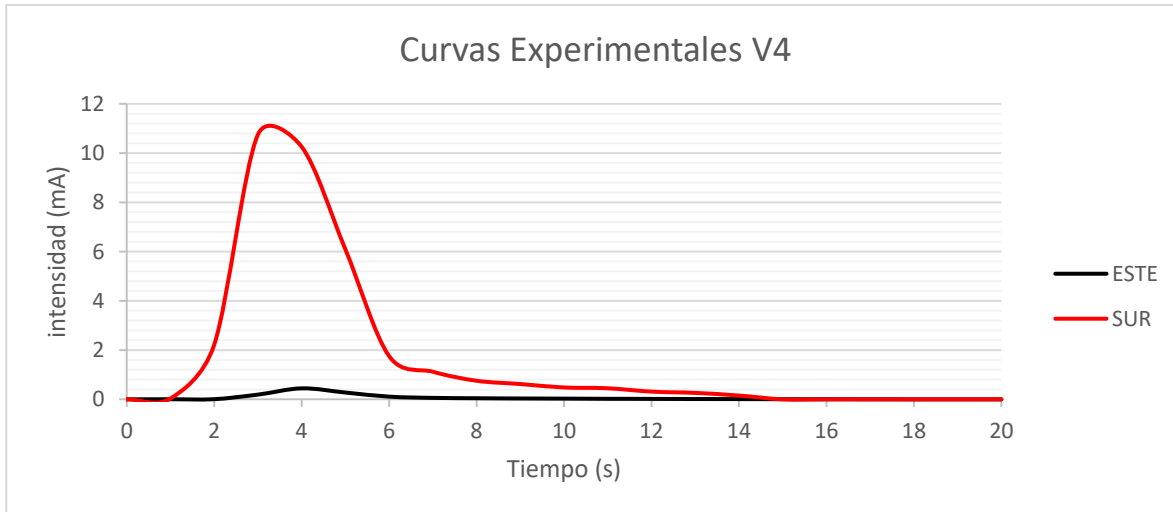


Figura 40. Ejemplo de la discretización de las curvas obtenidas mediante estímulo-respuesta.

5.1.2.2. Promediación de curvas para pulso de entrada en CFD

La inyección del trazador en CFD debe asimilarse al pulso que se realizó en el dispositivo experimental. Aunque en todas las pruebas se inyectó una cantidad fija de trazador, verificando que se mantuviera el mismo tiempo, es común que se encuentren ciertas diferencias de magnitud entre cada inyección. El pulso que se realiza controlando la válvula de esfera para la inyección del trazador es muy probable que no asemeje a un pulso simétrico. No sólo se trata de la incertidumbre del movimiento de la mano, si no que la configuración interior de la válvula de esfera podría manejar la entrada del trazador de una manera irregular a la de un flujo continuo homogéneo. Por tanto, describir dicha entrada de trazador mediante un pulso simétrico es complejo (por ejemplo, un pulso Gaussiano).

Entonces, la manera más oportuna de describir la entrada de trazador es analizando la forma obtenida en las salidas mediante sus curvas. La manera en que se aplicó la inyección del trazador en CFD fue mediante una promediación de las curvas a las salidas Este y Sur en cada prueba respectiva. Para ello, se suman los valores de intensidad en su respectivo tiempo $i(t)$ de cada salida y se divide el resultante entre 2. Se obtiene lo mostrado en la figura 41.

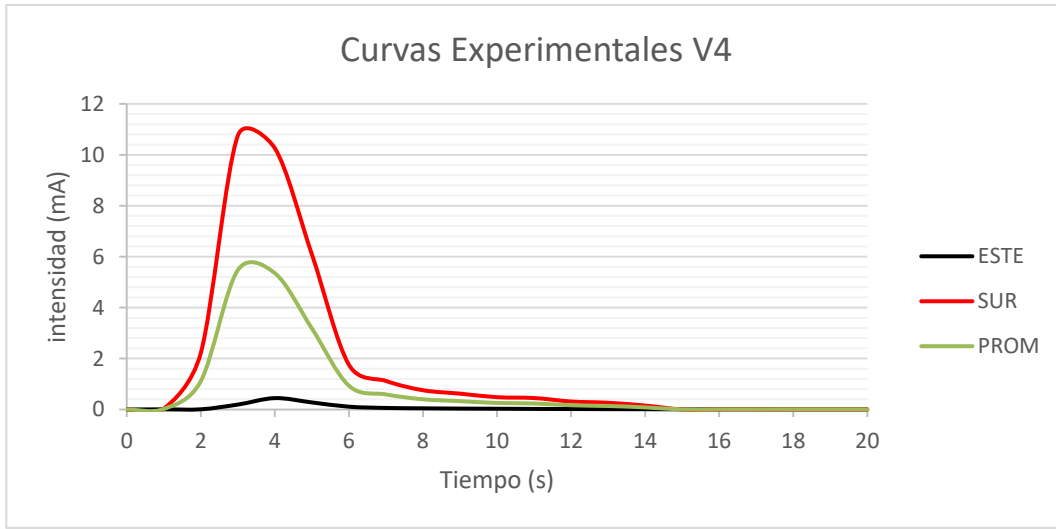


Figura 41. Curva promedio que servirá como pulso de entrada para la simulación en CFD.

La curva promedio se multiplicó por el siguiente coeficiente:

$$\frac{M * i(t)}{\text{Máx}(i \in I)} \quad (58)$$

Donde:

- M = concentración molar (mol/m^3) definida en los escenarios experimentales
- $i(t)$ = intensidad registrada en el tiempo t
- I = conjunto de intensidades $i(t)$

La curva resultante se implementa en CFD como pulso de entrada de trazador (Figura 41) en la frontera Oeste. Dicha inyección se asume que entra uniformemente por toda el área transversal de la tubería, debido a que la inyección se realizó a 3.5m antes de la frontera.

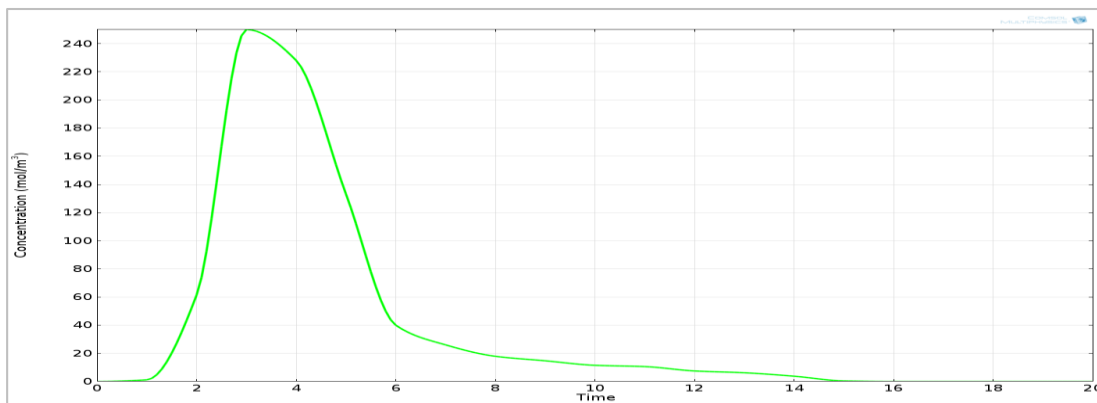
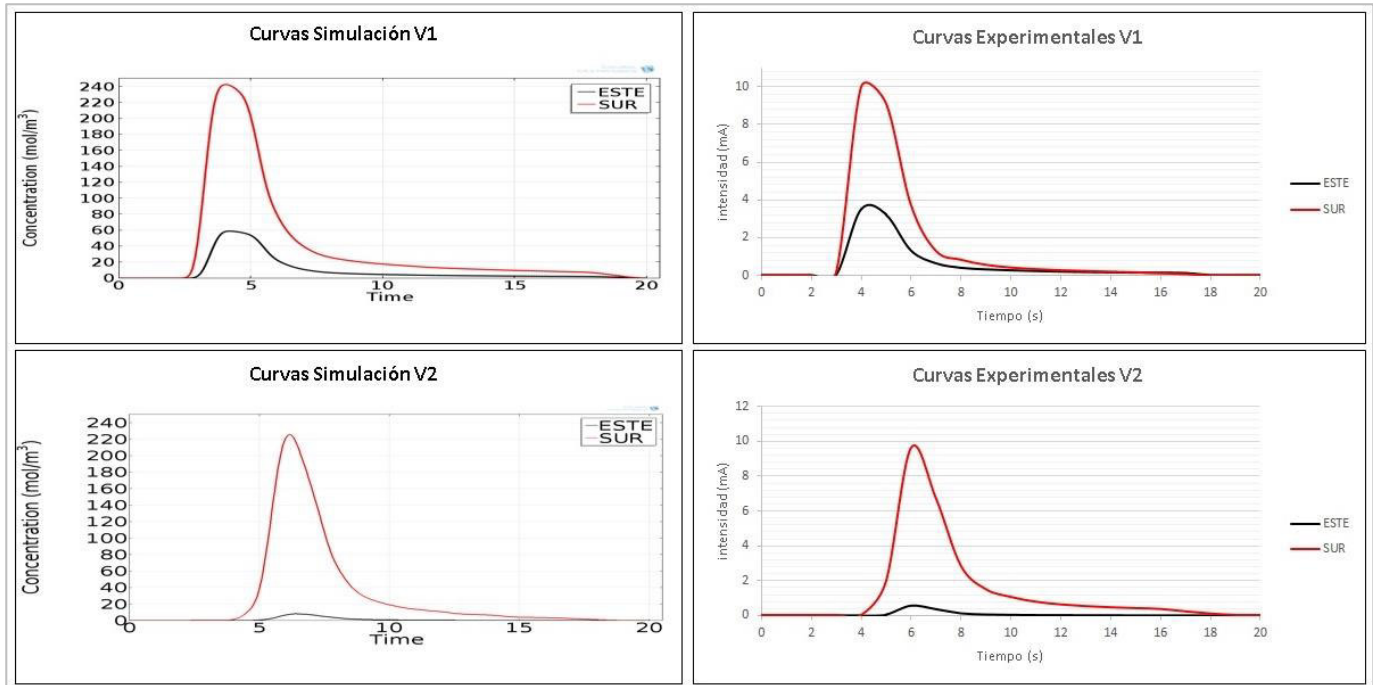


Figura 42. Curva promediada implementada en CFD como pulso de inyección de trazador para la simulación.

5.1.2.3. Curvas DTR

Una vez derivadas las gráficas de los ensayos experimental y simulado, se realiza una comparativa entre las curvas para analizar la representación de la simulación. Las dimensiones de los ejes de las gráficas son muy diversas (Figura 43).



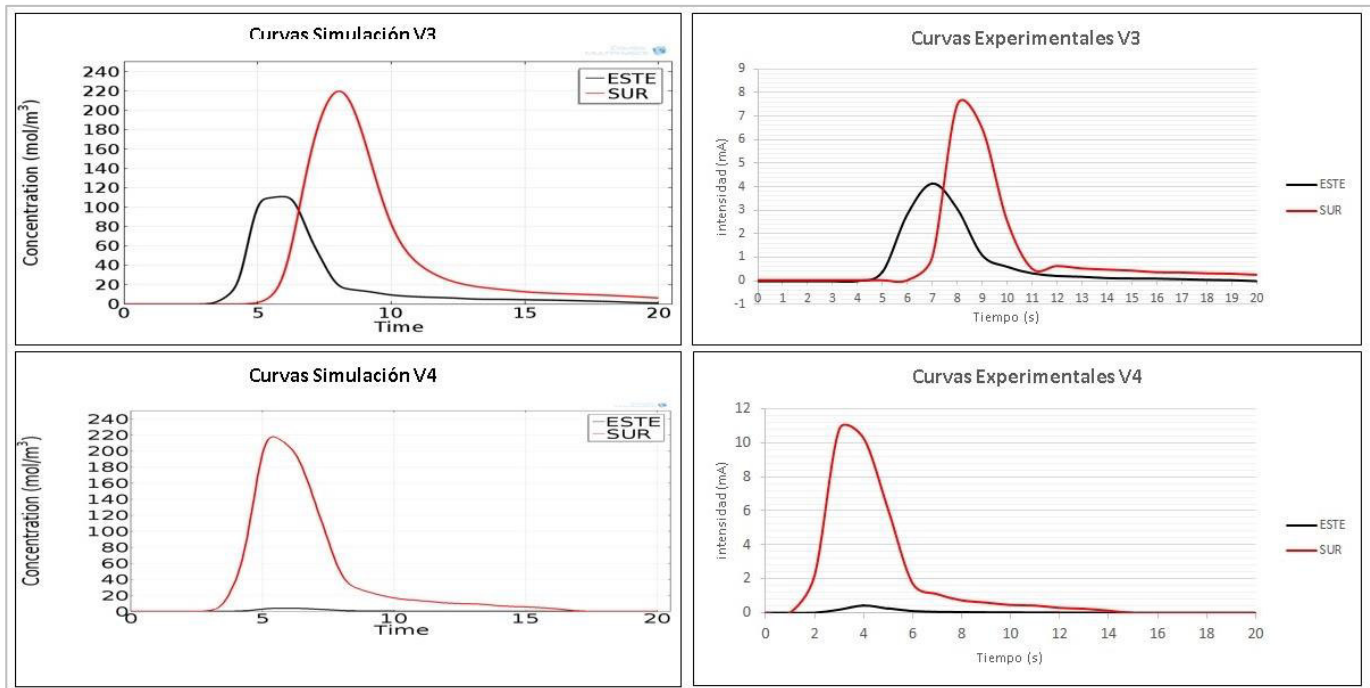


Figura 43. Curvas de ensayos de validación experimentales y simuladas en CFD.

A continuación, se hace una parametrización de las curvas (figura 42) mediante la función (52) del punto 4.2.1.5. Al hacer la parametrización, las dimensiones y área de las curvas serán equivalentes y de esta manera, se comprueba los tiempos de residencia del trazador y su similitud con la realidad.

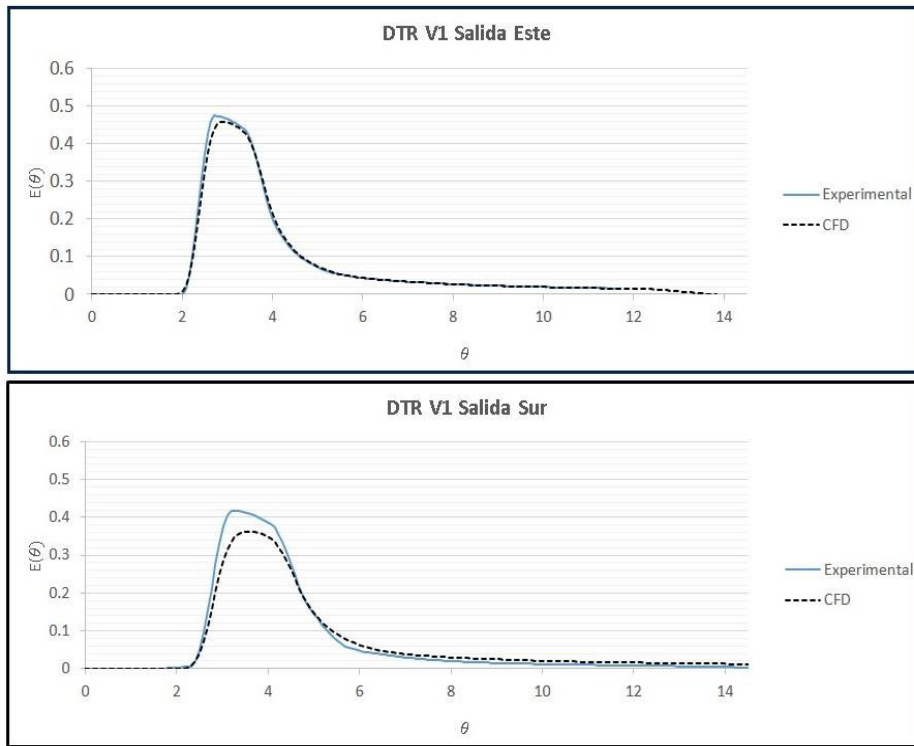


Figura 44. Curvas DTR prueba de validación V1.

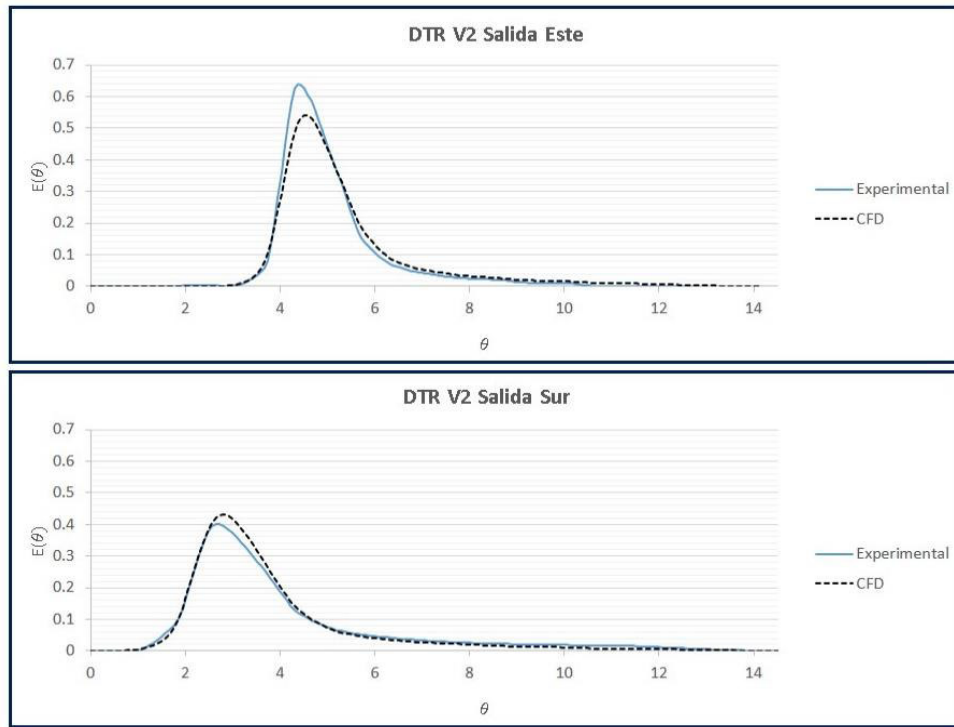


Figura 45. Curvas DTR prueba de validación V2.

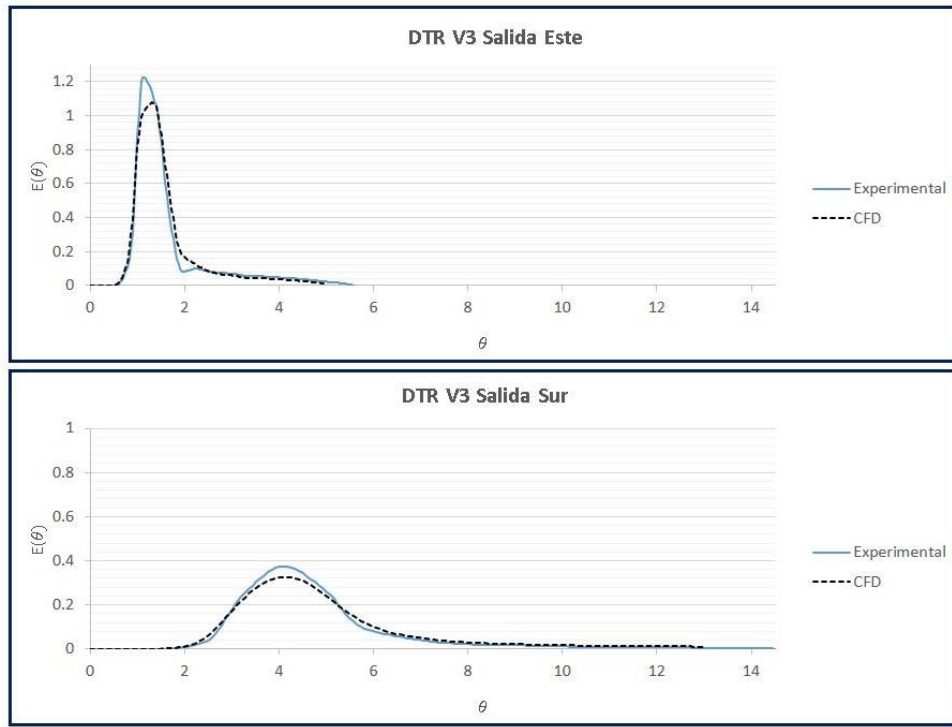


Figura 46. Curvas DTR prueba de validación V3.

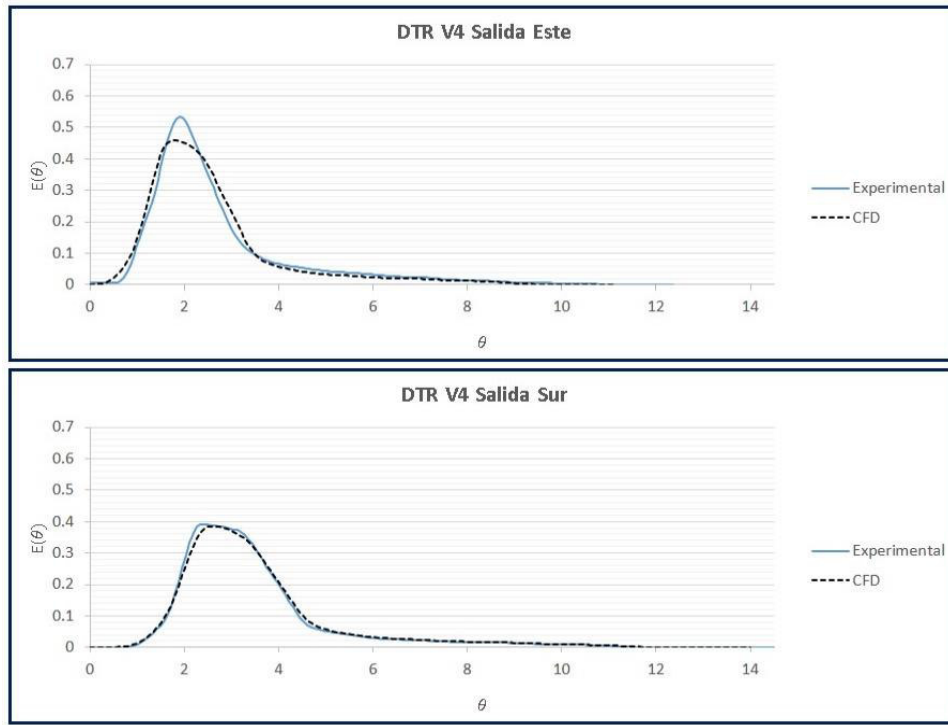


Figura 47. Curvas DTR prueba de validación V4.

Las curvas obtenidas para las pruebas de validación V1-V4 (Figuras 44-47) reflejan que el trazador está siguiendo un patrón de flujo de trazador similar a la inyección experimental. Para cuantificar dichas variaciones se puede calcular un error cuadrático medio mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - C_i)^2}{n}} \quad (59)$$

Donde:

- E_i, C_i = Valores parametrizados de la curva Experimental y CFD respectivamente en el tiempo i
- n = número de datos (instantes de tiempo)

Tabla 16. Valores de RMSE para las curvas parametrizadas.

RMSE	V1	V2	V3	V4
SEste	0.0093	0.0222	0.0509	0.0215
SSsur	0.0181	0.0109	0.0140	0.0072

La RMSE estimada para cada curva asigna un parámetro que describe la distancia promediada de la variación de cada *residuo* (en estadística se llama *residuo* a la diferencia al cuadrado del valor medido y el valor modelado). La RMSE tendrá un mayor valor, mientras mayor sea el desfase de los valores de las curvas. En este caso, en todas las pruebas se mantiene una representación cercana en la mayor parte de la curva. Los picos de las curvas, es en la zona donde se presenta la mayor diferencia, sin embargo, a pesar de haber simulado con un promedio entre ambas salidas, las curvas se asemejan en su anchura y en la pendiente diferencial que se adquiere, una vez pasando estas zonas de máximos. Esto quiere decir que los tiempos de residencia que sufre el trazador al atravesar el centro y las tuberías del crucero se mantienen homogéneas y realizan una distribución similar. No sólo viendo la similitud de las curvas DTR, si no las curvas obtenidas en cada proceso experimental como se observa en la figura 43.

A pesar de dichas diferencias, aun la tendencia conserva una buena proximidad en cuanto a la distribución del trazador, lo que refleja que si se tiene un modelo suficientemente calibrado para la representación del fenómeno de mezcla y se pueden obtener resultados confiables para realizar un análisis de mezcla en cruceros.

5.1.2.4. Variación del coeficiente de difusión turbulenta.

La difusión turbulenta asigna un valor de dispersión molecular especial considerando los movimientos aleatorios que sigue la mecánica de fluidos dado un régimen turbulento (Malalasekera, 2010).

Algunos autores que han trabajado en simular sus modelos en CFD, pusieron especial énfasis en la difusión turbulenta para interpretar de mejor manera el transporte de un trazador o contaminante a través de agua o aire. Donzis et al., (2014) trabajó desde difusión molecular hasta régimen turbulento (alrededor de 5800), sin embargo, concluyen que a valores de turbulencia alrededor de 5800, el número de Schmidt turbulento, Sc_T aumentaba hasta 1.36, sin embargo, aumentando la turbulencia no se detectaba ningún cambio considerable. Guatieri et al. (2017) trabajaron en flujos estáticos (dispersión en tanques) hasta flujos turbulentos ambientales (corrientes de aire, canales simulando movimiento de ríos, etc.). Concluyeron que el valor de Sc_T varía localmente y el mismo debe calcularse dependiendo de la condición de turbulencia. De igual manera, sólo trabajaron con valores de Re alrededor de 4900. Ivanova et al. (2013) concluyen que los valores para Sc_T muy bajos (0.2-0.3) sólo aumentan abruptamente la difusión sin parecerse en lo absoluto a la realidad, mientras que un valor óptimo para ellos fue de 0.5 para la intrusión de un chorro cruzado a un flujo continuo. Los anteriores trabajaron con modelos de turbulencia basados en las ecuaciones de promediadas de Navier Stokes, sin embargo, sólo Deonzis et al., (2014) utilizó el modelo $k-\epsilon$.

Se presenta una variación de la difusión turbulenta, en la búsqueda de verificar si el modelo, bajo estas condiciones de presión y velocidad varía significativamente si se modifica el coeficiente de Sc_T . Para ello, se simuló en diferentes valores la difusividad turbulenta, mediante asignaciones al número de Schmidt Turbulento Sc_T . El rango de valores para este parámetro es de 0.61, 0.71, 0.81 y el valor obtenido mediante el modelo de Kays-Crawford (1997), el cual asciende a 0.5666... (Figura 48 y 49).

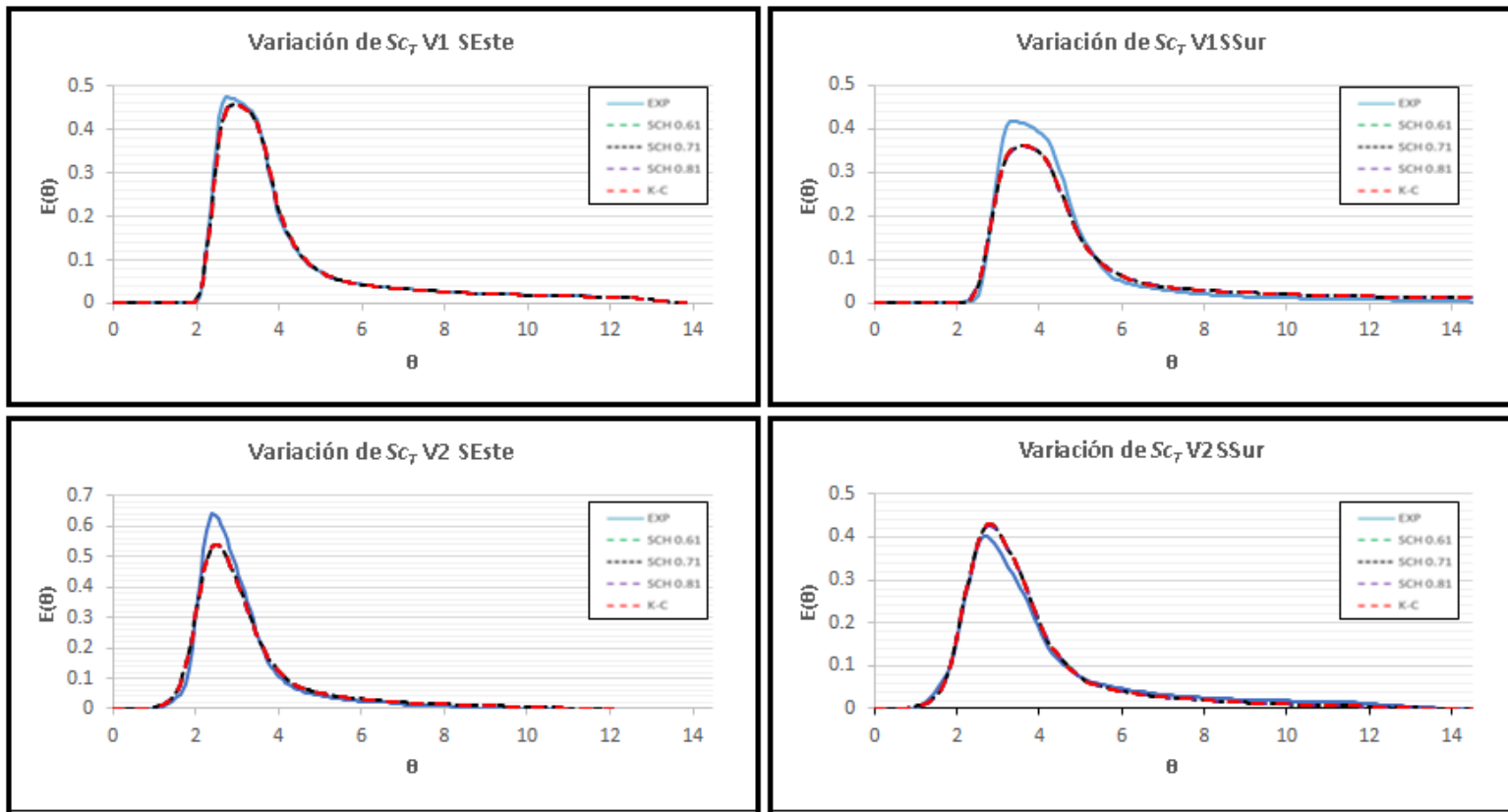


Figura 48. Gráficas de variación de Sc_7 para las pruebas V1 y V2. Se muestran las curvas DTR con variación en Sc_7 con valores desde 0.566 (K-C 1997), 0.61, 0.71 y 0.81. La variación que se obtuvo fue muy baja, únicamente modificaba los 4 decimales de precisión de cada valor de la curva, por lo que las curvas parecen “encimadas”.

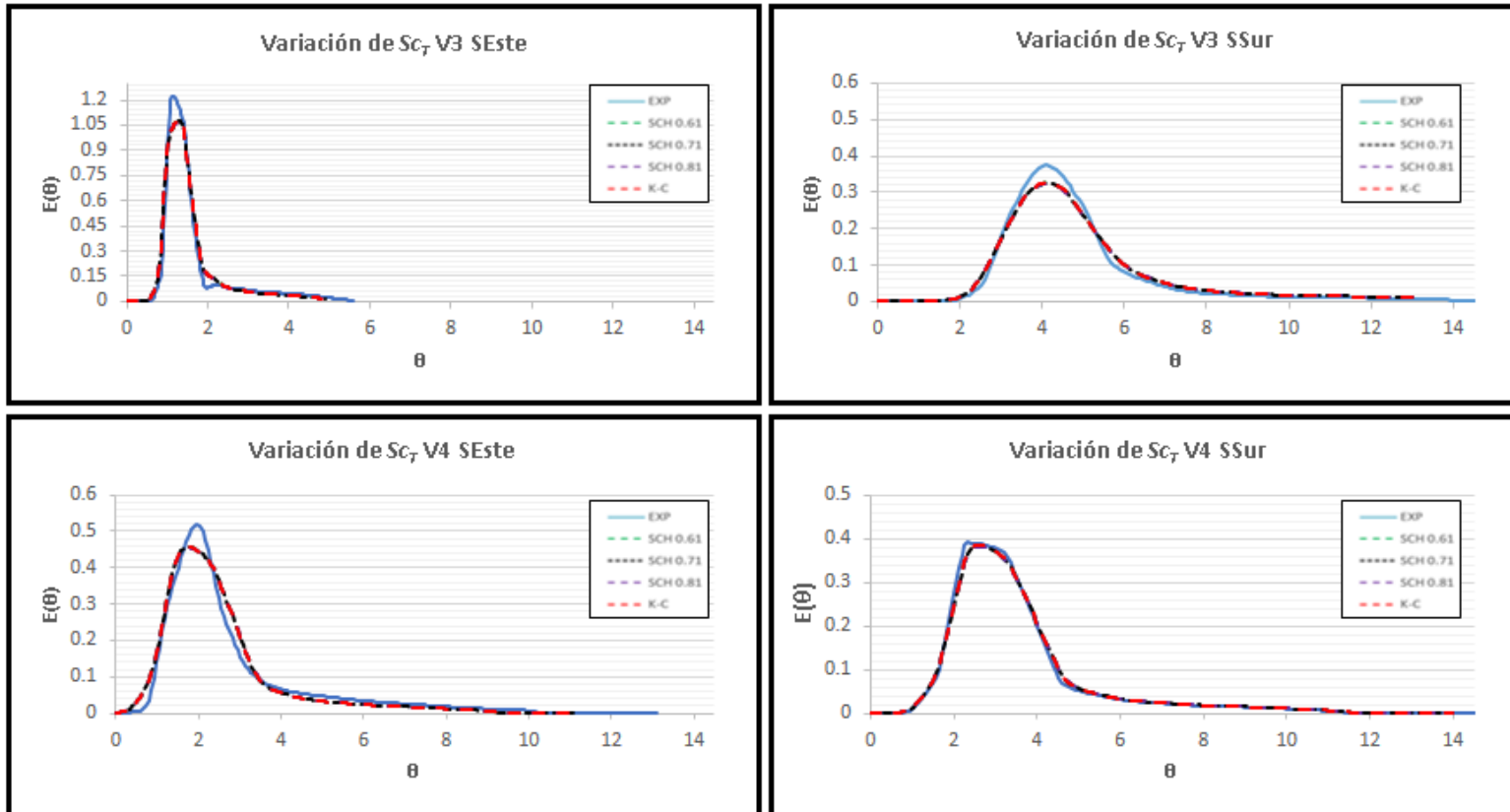


Figura 49. Gráficas de variación de Sc_7 para las pruebas V3 y V4. Se muestran las curvas DTR con variación en Sc_T con valores desde 0.566 (K-C 1997), 0.61, 0.71 y 0.81. La variación que se obtuvo fue muy baja, únicamente modificaba los 4 decimales de precisión de cada valor de la curva, por lo que las curvas parecen “encimadas”

Los resultados indicaron que el modelo no es sensible a la variación de este coeficiente de Schmidt turbulento, ya que la parametrización de las curvas refleja resultados prácticamente homogéneos. Se puede verificar dicha conclusión si se obtiene de nueva cuenta un error cuadrático medio para cada caso.

Tabla 17. Valores de RMSE para las curvas de variación de Sc_T . Se resaltan los valores más próximos (menos valor de RMSE) a las curvas experimentales. Se comprueba que el valor utilizado de Sc_T basado en el modelo de Kays-Crawford (1997) fue el más adecuado en la mayoría de los casos)

RMSE	Coeficiente Sc_T (adim)			
	0.61	0.71	0.81	K-C (0.566)
V1 S Este	0.0090	0.0085	0.0081	0.0093
V1 S Sur	0.0182	0.0184	0.0186	0.0181
V2 S Este	0.0223	0.0226	0.02282	0.0220
V2 S Sur	0.0109	0.0107	0.0106	0.0106
V3 S Este	0.0509	0.0509	0.0509	0.0509
V3 S Sur	0.0143	0.0147	0.0151	0.0140
V4 S Este	0.0215	0.0216	0.0216	0.0215
V4 S Sur	0.0073	0.0074	0.0076	0.0072

La tabla anterior hace constar que la variación se comprueba que el valor utilizado de Sc_T basado en el modelo de Kays-Crawford (1997) fue el más adecuado en la mayoría de los casos. Los valores de Sc_T si tienen una repercusión, aunque en muy baja en escala para el modelo simulado. En la siguiente figura, se observa que la difusión se incrementa en las zonas de mayor recirculación y menos velocidad en el modelo. Esto debería tener una mayor influencia, según la bibliografía consultada, pero por el momento, se puede determinar que los rangos de velocidad y presión sobrepasan por mucho los casos estudiados y esto nos dice que a grandes niveles de velocidad y presión, la difusividad turbulenta no tiene un impacto significativo en el transporte de soluto.

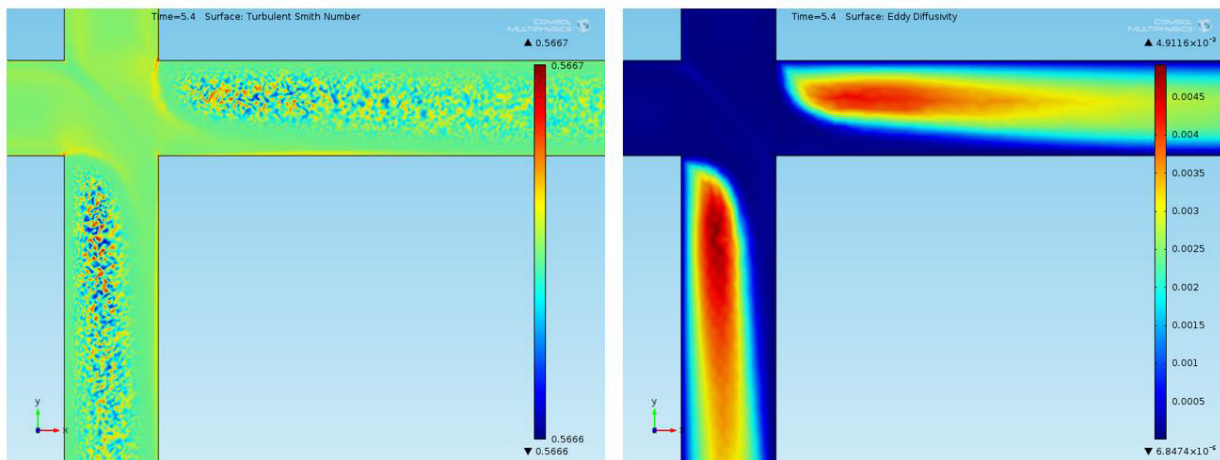


Figura 50. Gráficos del número de Schmidt turbulento basado en el modelo de Kays-Crawford (1997) y su influencia en la difusión turbulenta en las zonas de mayor turbulencia del modelo.

5.2. ANÁLISIS DE MEZCLA EN CRUCEROS

El siguiente análisis presenta los resultados de la inyección de trazador en las dos entradas del crucero, variando sus concentraciones y determinando el grado de distribución a las salidas. Para esto, se simularon los 12 escenarios, los cuales abarcan los 4 grupos de velocidades posibles en un crucero (figura 31). Los escenarios se ejecutaron en el dispositivo experimental y se registraron las lecturas de velocidad y presión en sus fronteras respectivas, se mostraron en la tabla 12 del capítulo 4.

5.2.1. Aproximación hidrodinámica de los 12 escenarios

En la siguiente tabla se muestran los resultados de aproximación para los 12 escenarios. Las simulaciones en CFD se ejecutan en las dos partes del análisis. La primera es de FLUJO DE FLUIDO TURBULENTO para el cálculo de velocidades y presiones. El segundo es para TRANSPORTE DE ESPECIES

DILUIDAS. Para que el transporte de especies diluidas pueda regresar resultados confiables, el escenario debe estar aproximado en cuando a su campo de velocidades, ya que de éste depende el cálculo del transporte de especies diluidas, como se indicó en la ecuación (53).

Tabla 18. Resultados de la simulación de flujo de fluido y su proximidad con los datos registrados en el crucero experimental. %dif representa el valor porcentual de la diferencia entre simulación y ensayo experimental, respecto al primero.

		P1			P2			P3			P4		
		MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.
Pre (bar)	N	1.60	1.5770	1.437%	0.90	0.9130	1.444%	1.92	1.9230	0.158%	1.88	1.8926	0.670%
	O	1.60	1.5764	1.478%	0.90	0.9126	1.403%	1.91	1.9234	0.703%	1.88	1.8927	0.677%
vel (m/s)	E	1.0620	1.0598	0.211%	1.0252	1.0187	0.627%	1.2007	1.1927	0.665%	1.0046	0.9874	1.720%
	S	1.3235	1.3217	0.133%	0.9593	0.9596	0.035%	0.9629	0.9674	0.472%	1.1668	1.1800	1.130%
		P5			P6			P7			P8		
		MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.
Pre (bar)	N	1.60	1.6161	1.005%	1.72	1.7320	0.698%	1.57	1.5779	0.502%	0.59	0.60	1.189%
	O	1.60	1.6158	0.989%	1.72	1.7339	0.811%	1.56	1.5753	0.982%	0.59	0.60	1.781%
vel (m/s)	E	1.0723	1.0787	0.592%	1.1069	1.1162	0.845%	1.0399	1.0438	0.381%	1.1358	1.1299	0.524%
	S	1.3296	1.3195	0.763%	1.1222	1.1082	1.249%	1.3019	1.2941	0.593%	2.2635	2.2641	0.026%
		P9			P10			P11			P12		
		MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.	MEDIDO	SIMULADO	% dif.
Pre (bar)	N	1.60	1.6176	1.099%	0.66	0.6492	0.879%	1.96	1.9713	0.575%	0.32	0.3192	1.483%
	O	1.60	1.6168	1.048%	0.66	0.6526	0.889%	1.96	1.9709	0.557%	0.32	0.3172	2.129%
vel (m/s)	E	0.9936	0.9937	0.010%	1.0800	1.0815	0.141%	1.2463	1.2371	0.744%	1.9742	1.9813	0.360%
	S	1.3311	1.3274	0.279%	2.4775	2.4703	0.292%	0.4266	0.4215	1.192%	1.7979	1.7847	0.734%

Los porcentajes de proximidad para la simulación de la velocidad se encuentran desde 0.01% hasta 1.72%. Mientras que para presión, el rango comprende de 0.158% al 2.129%. Estos resultados para un flujo en régimen estacionario posiblemente podrían aproximarse aún más, ya que, en cada prueba, las lecturas que se obtuvieron son el resultado de un promedio, tanto en los medidores electromagnéticos como en los de propela y volumétricos. Dichas velocidades varían aproximadamente estos porcentajes en cada instante de tiempo. La representación en CFD se acerca con buena precisión a los escenarios propuestos.

Teniendo el modelo bien representado desde el punto de vista hidrodinámico, podemos tener la confiabilidad de que los vectores de velocidad requeridos para el modelo de transporte de especies diluidas podrán inferir en una adecuada simulación de transporte de especies diluidas. Mediante CFD podemos encontrar las zonas en las que se produce un mezclado turbulento proveniente de dos flujos y que provoquen esos tiempos de residencia que se encontraron en las pruebas de validación. A continuación se presenta un gráfico de superficie de velocidades del escenario P5 que servirá de ejemplo, donde se visualizan vectores en cada elemento de la malla seleccionada.

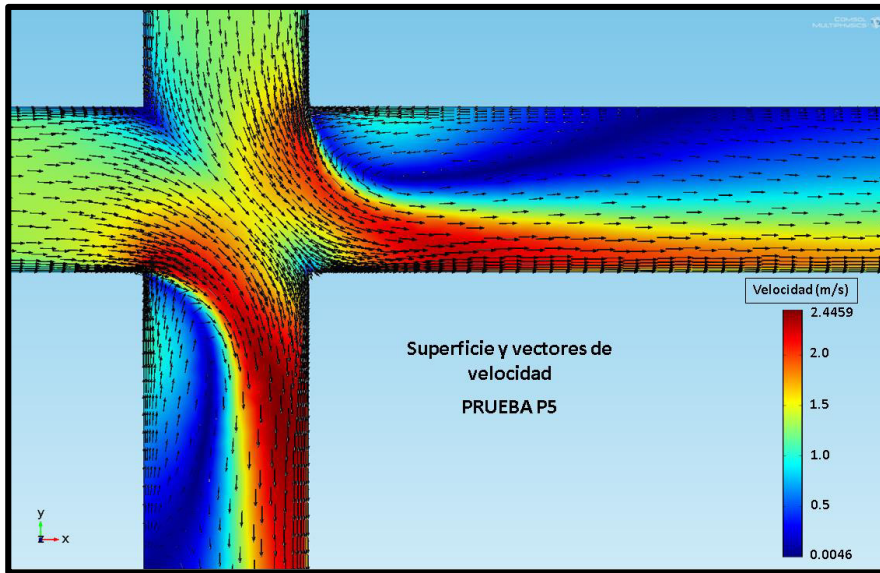


Figura 51. Gráfico de vectores de velocidad y expresión de color en la superficie del contorno de simetría. Resultados para el escenario P5.

En la gráfica anterior se aprecian zonas donde el fluido proveniente de una entrada adquiere velocidad debido al empuje que obtiene del flujo de la otra entrada, así como es ocasionado por la geometría interna del cruceo, al forzar al flujo parcialmente mezclado a bifurcarse para distribuirse a dos salidas. Al ocurrir esto, otras zonas presentan velocidades bajas y recirculación al quedar con el mínimo flujo. Lo anterior también puede estar influido por el agua proveniente de la geometría lineal de la tubería. Dichas zonas de recirculación también pueden verificarse en la siguiente figura de líneas de corriente de las dos entradas Norte y Este:

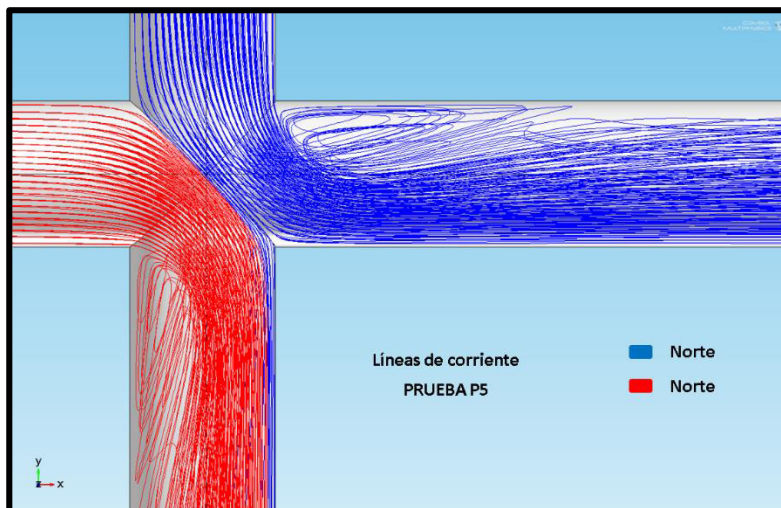


Figura 52. Líneas de corriente, escenario P5.

5.2.2. Simulación de transporte de especies diluidas para escenarios propuestos

Para la simulación del transporte de especies diluidas se necesita el vector de velocidades determinado anteriormente. Como se describió en la parte de la validación del modelo CFD, la convección es el motor principal del transporte del trazador. Todos los escenarios se simularon en régimen no permanente, con una duración de 20 segundos. Aunque la aplicación de la inyección en las entradas es constante, la concentración inicial es 0 mol/m³. El curso del trazador se estabiliza a los primeros 3 segundos. Sin embargo, se fijó este tiempo porque la simulación alcanza su convergencia de una manera más rápida, que tomando un menor tiempo.

Para describir los resultados de la implementación de concentraciones en las dos entradas del crucero, se mostrarán gráficos de 4 escenarios descritos en la tabla 12. Cada escenario pertenece uno de los 4 grupos de combinación de velocidades que se mostró en la figura 31. Se enlistan a continuación:

- Grupo 1: P4
- Grupo 2: P3
- Grupo 3: P6
- Grupo 4: P10

En las figuras 52 a 55 se presentan, mediante configuración de color y valores numéricos, los valores de concentración siguiendo las asignaciones a las entradas de la tabla 13 para los escenarios enlistados anteriormente, en donde la concentración en la frontera oeste es constante (250) y en frontera norte se variaron las concentraciones desde 0 hasta 500.

De igual forma se muestra un coeficiente llamado S (de salida), el cual se obtiene mediante la siguiente relación:

$$S = \frac{C_{Este}}{C_{Sur}} \quad (60)$$

Donde:

- C_{Este} , C_{Sur} = concentraciones a las salidas Este y Sur respectivamente

Este coeficiente será utilizado para determinar una relación de concentraciones a las salidas Este y Sur, dadas las condiciones de entrada (Gastos y concentraciones) y también los gastos de salida. De los 12 escenarios propuestos, se obtuvieron las concentraciones a las salidas mediante CFD para cada indicador del coeficiente E. Los resultados de las concentraciones a las salidas se muestran en la siguiente tabla 19.

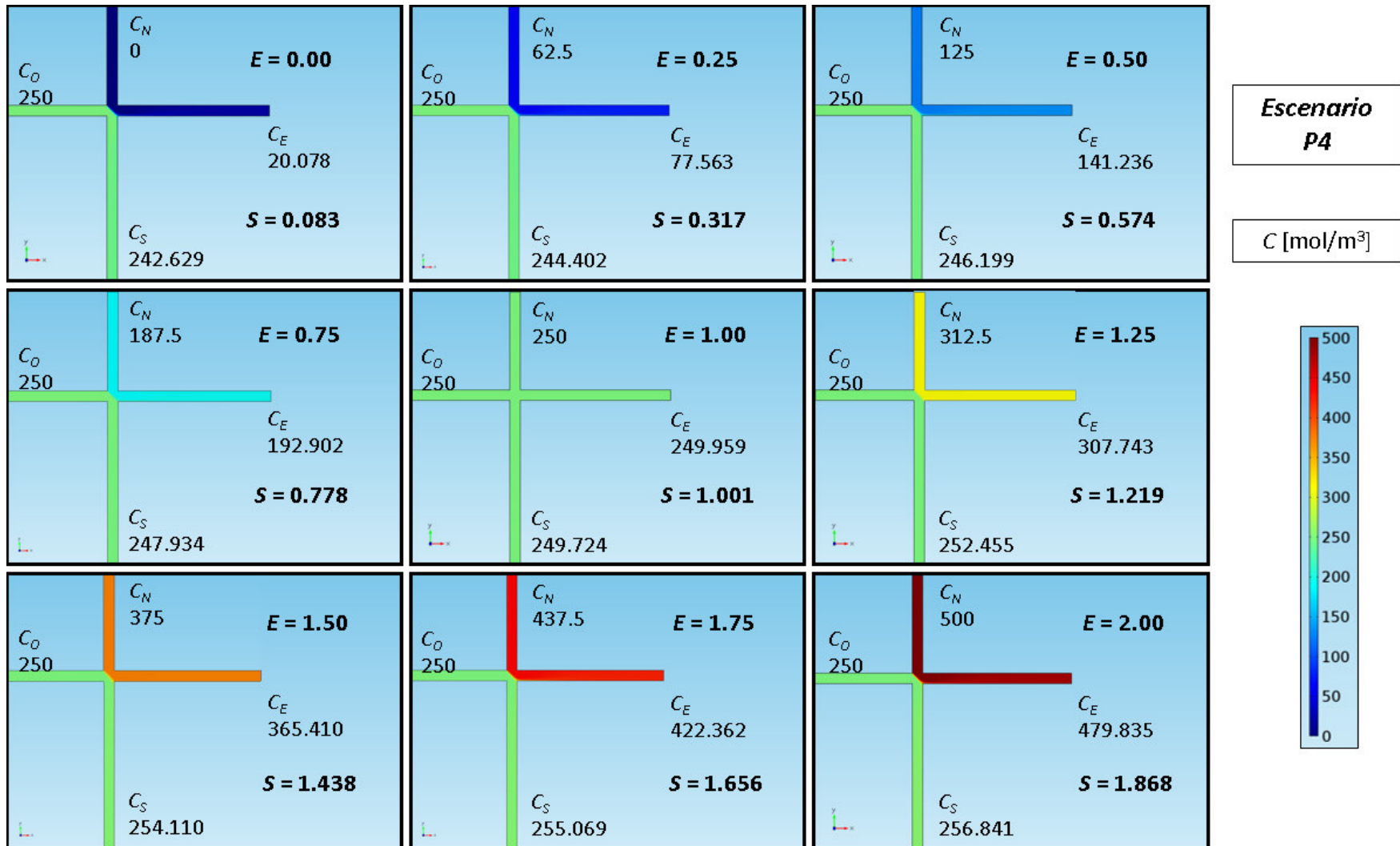


Figura 53. Concentraciones (mol/m³) en las fronteras del crucero y valores de los coeficientes E y S del escenario P4 (Velocidades de entrada y velocidades de salida similares).



Figura 54. Concentraciones (mol/m³) en las fronteras del cruce y valores de los coeficientes E y S del escenario P3 (Velocidades de entrada similares y velocidades de salida diferentes).



Figura 55. Concentraciones (mol/m³) en las fronteras del cruceo y valores de los coeficientes E y S del escenario P6 (Velocidades de entrada diferentes y velocidades de salida similares).



Figura 56. Concentraciones (mol/m³) en las fronteras del crucero y valores de los coeficientes E y S del escenario P10 (Velocidades de entrada y velocidades de salida diferentes).

E	8.745	5.68	0.025	66.71	0.287	127.72	0.536	188.73	0.773	258.44	1.028	310.73	1.216	381.65	1.447	432.75	1.620	493.77	1.809
S	10.698	226.83		232.58		238.33		244.08		251.49		255.62		263.72		267.14		272.90	

Front	Q (L/s)	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S
P6	N	6.617	0	62.5	62.5	125	125	187.5	187.5	250	250	312.5	312.5	375	375	437.5	437.5	500	500
	O	11.445	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	E	9.050	68.95	114.18	114.18	161.83	161.83	208.50	208.50	255.56	255.56	299.30	299.30	350.56	350.56	392.72	392.72	437.07	437.07
	S	8.984	248.42	248.79	248.79	249.16	249.16	249.53	249.53	249.91	249.91	247.15	247.15	250.65	250.65	251.02	251.02	251.39	251.39

Front	Q (L/s)	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S
P7	N	6.553	0	62.5	62.5	125	125	187.5	187.5	250	250	312.5	312.5	375	375	437.5	437.5	500	500
	O	12.432	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	E	8.463	59.60	107.13	107.13	154.69	154.69	202.18	202.18	249.66	249.66	297.20	297.20	344.73	344.73	392.25	392.25	439.81	439.81
	S	10.492	247.52	248.13	248.13	248.73	248.73	249.34	249.34	249.96	249.96	250.57	250.57	251.17	251.17	251.79	251.79	252.39	252.39

Front	Q (L/s)	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S
P8	N	10.881	0	62.5	62.5	125	125	187.5	187.5	250	250	312.5	312.5	375	375	437.5	437.5	500	500
	O	16.679	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	E	9.160	3.61	65.12	65.12	126.64	126.64	188.14	188.14	249.60	249.60	311.09	311.09	372.59	372.59	434.09	434.09	495.59	495.59
	S	18.356	224.90	231.14	231.14	237.46	237.46	243.65	243.65	249.86	249.86	256.11	256.11	262.37	262.37	268.61	268.61	274.85	274.85

Front	Q (L/s)	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S
P9	N	9.547	0	62.5	62.5	125	125	187.5	187.5	250	250	312.5	312.5	375	375	437.5	437.5	500	500
	O	9.927	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	E	8.745	7.10	67.76	67.76	128.41	128.41	189.06	189.06	249.68	249.68	310.32	310.32	370.97	370.97	431.61	431.61	492.26	492.26
	S	10.698	230.90	235.68	235.68	240.46	240.46	245.24	245.24	250.04	250.04	254.84	254.84	259.63	259.63	264.42	264.42	269.21	269.21

Front	Q (L/s)	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S
P10	N	18.083	0	62.5	62.5	125	125	187.5	187.5	250	250	312.5	312.5	375	375	437.5	437.5	500	500

O	10.759	250		250		250		250		250		250		250		250		250	
E	8.768	0.11	0.001	62.62	0.383	125.16	0.651	187.83	0.850	250.24	1.000	312.91	1.123	375.46	1.221	437.85	1.302	500.39	1.371
S	20.027	135.17		163.43		192.25		221.04		250.28		278.64		307.54		336.26		365.08	

P11	Front	Q (L/s)	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S		
	N	5.450	0	S_0	62.5	$S_{0.25}$	125	$S_{0.5}$	187.5	$S_{0.75}$	250	S_1	312.5	$S_{1.25}$	375	$S_{1.5}$	437.5	$S_{1.75}$	500	S_2
	O	8.020	250		250		250		250		250		250		250		250		250	
	E	10.029	113.65	0.456	147.71	0.592	181.75	0.729	215.81	0.865	250.18	1.003	284.08	1.139	318.00	1.274	352.09	1.411	386.17	1.547
S	3.418	249.45		249.46		249.48		249.49		249.50		249.51		249.52		249.54		249.55		

P12	Front	Q (L/s)	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S	Conc	S		
	N	13.885	0	S_0	62.5	$S_{0.25}$	125	$S_{0.5}$	187.5	$S_{0.75}$	250	S_1	312.5	$S_{1.25}$	375	$S_{1.5}$	437.5	$S_{1.75}$	500	S_2
	O	16.697	250		250		250		250		250		250		250		250		250	
	E	16.063	36.77	0.149	90.01	0.363	143.25	0.576	196.48	0.788	249.70	0.999	303.61	1.208	356.18	1.417	410.41	1.624	462.67	1.831
S	14.469	247.09		247.79		248.50		249.20		249.91		251.33		251.32		252.72		252.73		

Se puede verificar en las figuras, 53-56, que la mezcla no ocurre de manera homogénea en la mayoría de los casos. Las concentraciones de diferente magnitud implementadas, desde una entrada sin concentración hasta tener el doble que la otra, no regresan un promedio ponderado de igual magnitud, salvo el caso en que se asigna igual concentración en ambas entradas (el coeficiente $E=1$, regresa un coeficiente S cercano a 1). El rango de la configuración de colores es algo homogéneo para describir 500 valores diferentes, pero en las cantidades CN, CO, CE, y CS se aprecia una gran diferencia en cuanto a una salida y a otra.

Analizando algunos valores característicos de S , por ejemplo, para el escenario P10, cuando $E = 0$, (Concentración Norte = 0 mol/m^3 y concentración Oeste = 250 mol/m^3), el resultado de S es igual a 0.001. Esto quiere decir que prácticamente el flujo se lleva casi por completo el trazador hacia la salida Sur (135.17 mol/m^3), mientras que la salida Este, fluye una reducida parte (0.110 mol/m^3). Debido a la convección del agua, el mayor gasto de entrada es por el Norte, y genera más flujo hacia la salida Sur, por lo que el arrastre del trazador predomina en la salida sur, atrayendo un flujo volumétrico mayor proveniente de ambas entradas. Un caso parecido ocurre en el escenario P7. El mayor flujo de salida es hacia el sur, sin embargo, ahora la entrada predominante es la Oeste. Esto refleja mayor proporción aportada hacia la salida Este, a diferencia del caso anterior.

Por otro lado, variando las entradas y salidas de manera invertida, caso del escenario P11, la mezcla se hace lo más homogénea posible (PERO NUNCA RECAE EN COMPLETA SALVO EN $E_{1.00}$). Esto pasa debido a que, se trata de un caso algo especial, la mayor velocidad fluye hacia el Este, pero en una gran proporción, de hecho es donde se presenta la mayor diferencia entre velocidades de salida (pudiéndose observar en el caudal que se conduce en cada salida, aproximadamente 10 l/s para la Este y 3.4 l/s para la Sur). Lo que provoca que, en los casos S_0 , $S_{0.25}$, $S_{0.5}$ y $S_{0.75}$, una gran parte de concentración fluya hacia el Este, porque el arrastre debido a la convección es casi el total hacia dicha frontera. Sin embargo, para S_0 , $S_{0.25}$, $S_{0.5}$ y $S_{0.75}$,

dicha concentración se mantiene con una pendiente un poco más fija, ya que la mayor concentración proviene de la entrada Norte, sin embargo, el flujo es mucho menor, por lo que no hay un aporte significativo aunque sea la entrada con mayor concentración.

Se presenta una gráfica con los resultados de la tabla 19 con visualización en forma de curvas, donde el eje horizontal corresponde al valor de E y el eje vertical describe sus correspondientes valores de S.

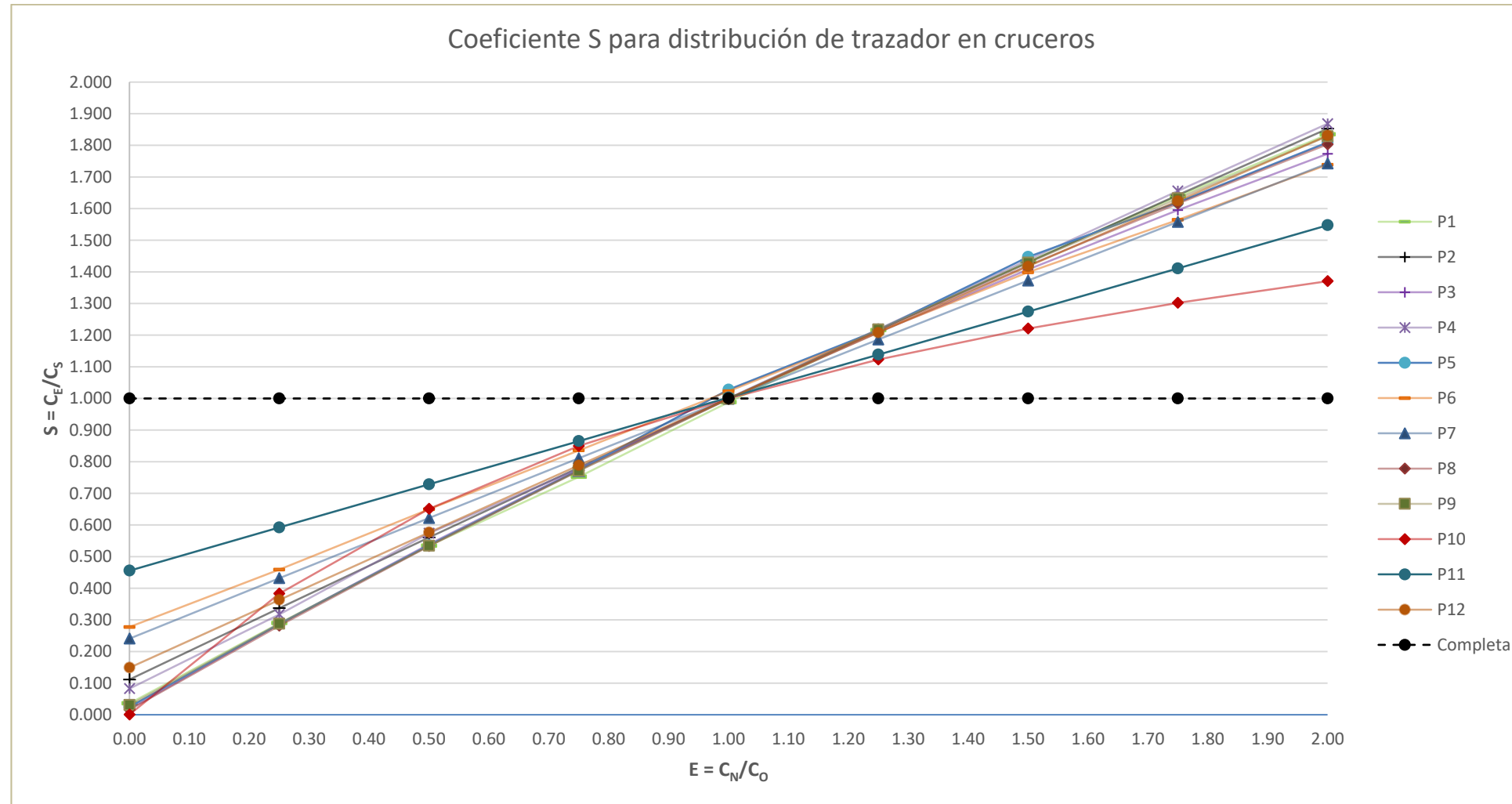


Figura 57. Gráfico de coeficiente E(horizontal) vs S(vertical), de los 12 escenarios con sus respectivas 9 variaciones de concentración de mezcla.

Hasta este punto, se puede concluir, tanto experimental como numéricamente, que la mezcla no ocurre de manera homogénea, salvo el caso en que la concentración a las entradas sea de igual proporción. La mezcla homogénea describe que en las salidas la concentración es de igual magnitud, por lo que el coeficiente S (ecuación 60) tendría que tener un valor de 1 en cualquier caso. Esta condición representa una gran diferencia respecto a los valores de S estimados para cualquiera de los 12 escenarios.

Los trazos de la figura 16 podrían asemejar a una línea recta, excepto para la prueba P10. Considerando dicha representación numérica, se pueden obtener las ecuaciones de las líneas rectas por interpolación lineal. Y verificar su modelado mediante el parámetro R^2 , que describe una distancia promediada del residuo de los puntos (distancia de separación) respecto a la recta. Sin embargo, para las pruebas P5, P6, P7 y P10 presentan valores de R^2 mayores a 0.81.

Para mejorar la precisión de una ecuación que permita interpolar adecuadamente los valores de S, se utilizó un método numérico para aproximar los puntos obtenidos a funciones polinómicas. Dicho método fue el de aproximación por mínimos cuadrados. El método permite obtener una ecuación polinómica de orden (n-1) (n= número de puntos por interpolar) que describa el comportamiento de S dados n puntos observados. Para lo anterior, si se utilizan los 9 puntos obtenidos para cada escenario, el polinomio sería de grado 8. Variando la entrada de puntos a interpolar a un número reducido (de 3 a 5), el grupo de funciones para los 12 escenarios que representan el coeficiente S, en función de E son:

$$\begin{aligned}
 P1(E) &= -0.052841E^2 + 1.0049E + 0.035921 \\
 P2(E) &= -0.01706E^2 + 0.90467E + 0.11139 \\
 P3(E) &= -0.10307E^2 + 1.0834E + 0.018478 \\
 P4(E) &= -0.025456E^2 + 0.94364E + 0.082754 \\
 P5(E) &= 0.007894E^3 - 0.10606E^2 + 1.0727E + 0.025038 \\
 P6(E) &= -0.02166E^3 + 0.048757E^2 + 0.71965E + 0.27756 \\
 P7(E) &= 0.00048463E^3 - 0.0087194E^2 + 0.7664E + 0.24077 \\
 P8(E) &= -0.08936E^2 + 1.0723E + 0.016051 \\
 P9(E) &= -0.068973E^2 + 1.0368E + 0.030728 \\
 P10(E) &= -0.077967E^4 + 0.46528E^3 - 1.1642E^2 + 1.7759E + 0.00083556 \\
 P11(E) &= -0.0012052E^2 + 0.54835E + 0.4556 \\
 P12(E) &= -0.0094417E^2 + 0.85981E + 0.14881
 \end{aligned} \tag{61}$$

De esta manera, se puede estimar un coeficiente S, dada la relación E, de las concentraciones de entrada C_N y C_O , para poder estimar las concentraciones a las salidas C_E y C_S .

5.3. Obtención de las concentraciones a las salidas mediante el coeficiente S

Hasta el momento, el coeficiente S (ecuación 60) no puede obtenerse de una manera directa las concentraciones a las salidas, debido a que es una relación entre dos variables desconocidas. Esta relación no puede estimar las concentraciones a las salidas, ya que no proviene de una concentración total que sea distribuida en alguna proporción. Este coeficiente se utilizará en un método numérico basado en la ecuación de conservación del flujo de masa a través de un cruce:

$$C_N Q_N + C_O Q_O = C_E Q_E + C_S Q_S \quad (62)$$

Donde:

- $C_{N, O, E, S}$ concentraciones en las fronteras N, O, E y S respectivamente
- $Q_{N, O, E, S}$ caudales en las fronteras N, O, E y S respectivamente

Despejando C_E de las ecuaciones (60) y (62) se obtiene:

$$C_E = \frac{C_N Q_N + C_O Q_O - C_S Q_S}{Q_E}$$

$$C_E = S C_S$$

Sustituyendo C_S y haciendo un procedimiento similar para C_E se obtiene:

$$C_S = \frac{C_N Q_N + C_O Q_O - C_E Q_E}{S Q_E} \quad (63a)$$

$$C_E = \frac{C_N Q_N + C_O Q_O - C_E Q_E}{S^{-1} Q_S} \quad (63b)$$

Se ha determinado una ecuación implícita, en donde se desconoce una única variable C en cada caso, en función de coeficiente S y de los demás datos de caudales y concentraciones conocidos. Para

resolver este tipo de ecuaciones, se pueden utilizar métodos numéricos para la estimación de un valor x , para una función $f(x)$ del siguiente estilo:

$$f(x) = 0$$

Visualizando la última ecuación obtenida en una función igualada a cero, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$f(C_E) = \frac{C_N Q_N + C_O Q_O - C_E Q_E}{S^{-1} Q_S} - C_E = 0 \quad (64a)$$

$$f(C_S) = \frac{C_N Q_N + C_O Q_O - C_S Q_S}{S Q_E} - C_S = 0 \quad (64b)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden resolver mediante el método de Newton-Raphson, dado que éstas cumplen con la forma $f(x)=0$ y es derivable, entonces se puede aplicar el método de la siguiente manera:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x)}{f'(x)} \quad (65)$$

Con esto, se pueden estimar las concentraciones a las salidas de un crucero, dados los siguientes puntos:

- El escenario del crucero a determinar sus concentraciones tiene dos entradas y dos salidas de flujo y se debe corroborar la continuidad
- Se conocen los caudales en las 4 fronteras
- Se conocen las concentraciones a las entradas

Con esta propuesta es posible trasladar los resultados de un modelo específico de un crucero a una red de abastecimiento de agua, en la que se presentan cierto número de cruceros dentro de su configuración.

5.3.1. Ejemplo de estimación de concentraciones con mezcla incompleta en una red de abastecimiento de agua

Para obtener las concentraciones de un escenario a estudiar mediante esta analogía en una red de abastecimiento de agua, se realizan los siguientes pasos:

1. Se enlistan las cuatro fronteras de caudales, y se fijan cuáles de ellas funcionan como entradas con sus respectivas concentraciones y cuáles restantes como salidas

2. Se determina, mediante las relaciones Q_M/Q_O y Q_E/Q_S cuál de los 12 escenarios propuestos es el que representa con mayor similitud el escenario a estudiar y el resultante se toma como base.
3. El escenario que más se aproxime al curso de flujos de los doce propuestos tiene una función específica del grupo de ecuaciones (61), entonces, mediante el parámetro E , se ingresa a la función seleccionada y se obtiene S .
4. Se aplica el método de Newton Raphson en las ecuaciones (64a y b) para aproximar los valores de C_E y C_S .

Los pasos anteriores se integraron en un código de programación, con el que se determinan con buena aproximación (hasta 24 decimales) las concentraciones buscadas, asemejando el escenario a uno de los doce estudiados. Con lo anterior se utiliza su correspondiente valor de S para resolver el método numérico.

A continuación se ejemplificará el estudio de otros escenarios de mezcla en cruceros y se obtendrán las concentraciones a las salidas, dados sus parámetros iniciales. Se utilizaron los valores de caudales provenientes de 4 cruceros implementados en la red de ejemplo número 3 de EPANET. La cual viene contenida en formato .net dentro de las carpetas de instalación del programa.

El net3.net contiene los siguientes componentes (Rossman 2000):

- 2 reservorios
- 3 tanques
- 2 bombas
- 117 tuberías
- 92 nodos
- 1 Patrón general de demanda y otros 4 patrones particulares en ciertos nodos.

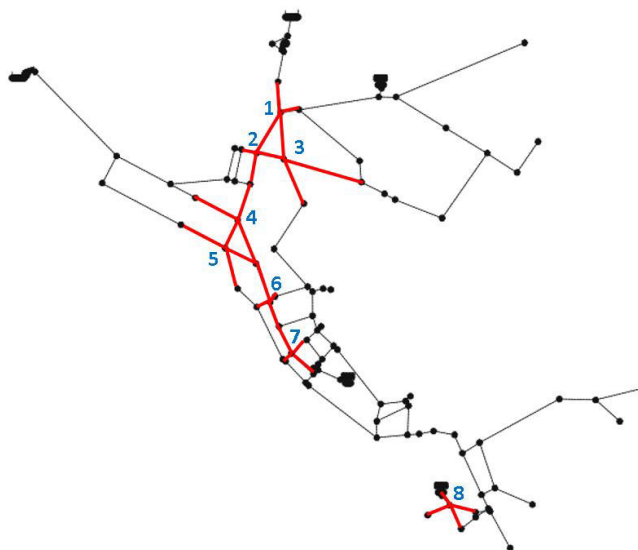


Figura 58. Trazo de la red modelo, net3.net y localización de los 8 cruces configurados en la red.

La red utilizada para el análisis es un trazo concreto, empleada en diversas investigaciones en el área de hidráulica y en el seguimiento de trazadores para distribución de contaminantes, así como para el uso de cloro. A su vez, contiene puntos donde la demanda a ciertos lapsos de tiempo es excesiva, así como sectores donde las demandas son bajas, provocando la incidencia de ciertos tiempos de residencia del agua en la red.

Se presentan los datos de 4 escenarios, obtenidos en tres de los ocho cruces presentes en el sistema, correspondientes en la figura 57, a los cruces 2, 4 y 7 (tabla 20).

Los valores de concentración asignados a las entradas fueron números aleatorios generados en el rango (0.2 – 1.5) [mg/L]. Rango correspondiente a los límites permisibles de concentración de cloro en redes de agua potable, establecidos en la NOM-SSA1-1997 de la Secretaría de Salud de México.

Se especifican los datos que corresponden a los valores de caudal para los 4 escenarios de cruce (un escenario para los cruces 6 y 4, y dos para el cruce número 2 de la figura 57), se aplica la ecuación de mezcla completa y se presentan los valores que se obtendrían en los programas de cómputo mediante dicho modelo. Los resultados de la mezcla completa aparecen resaltados en negritas.

Tabla 20. Datos Escenarios para ejemplo de estimación de concentraciones con modelo de mezcla incompleta, provenientes de la red de ejemplo de EPANET, net3.net (Rossmann, 2000). Los valores de concentración a las entradas fueron establecidos de manera aleatoria, dentro del rango 0.2-1.5mg/L, límites permisibles de concentración de cloro de la NOM SSA1 1997. Los valores a las salidas corresponden al cálculo con mezcla completa.

Descripción		EJEMPLO	CASOS DE CONCENTRACIÓN (mg/L)		
	Caudal (L/s)	E1	1	2	3
Crucero 6 Flujos a las 66:00 hrs de simulación	QN	13.106	0.68	1.31	1.07
	QO	9.811	1.21	0.84	1.19
	QE	8.863	0.907	1.109	1.121
	QS	14.051	0.907	1.109	1.121
	Caudal (L/s)	E2	1	2	3
Crucero 4 Flujos a las 52:00 hrs de simulación	QN	21.001	0.85	1.44	0.23
	QO	5.880	1.29	0.77	0.37
	QE	11.848	0.946	1.293	0.261
	QS	15.034	0.946	1.293	0.261
	Caudal (L/s)	E3	1	2	3
Crucero 2 Flujos a las 51:00 hrs de simulación	QN	14.478	0.64	1.28	0.87
	QO	8.855	1.13	0.66	0.67
	QE	16.828	0.826	1.045	0.794
	QS	6.504	0.826	1.045	0.794
	Caudal (L/s)	E4	1	2	3
Crucero 2 Flujos a las 71:00 hrs de simulación	QN	14.198	0.38	0.96	0.75
	QO	18.950	0.87	0.55	0.69
	QE	12.709	0.660	0.726	0.716
	QS	20.438	0.660	0.726	0.716

Se realiza el cálculo de las concentraciones C_E y C_S mediante la metodología para mezcla incompleta desarrollada en el presente trabajo, obteniendo la comparativa de las concentraciones a las salidas de los 3 cruceros con los tres diversos casos de concentración, resultando lo siguiente:

Tabla 21. Concentraciones resultantes a las salidas mediante modelos de mezcla completa y mezcla no completa obtenida en el presente proyecto.

	Caso ->	1			2			3		
E	Front	C	I	%dif	C	I	%dif	C	I	%dif
1	C_E	0.907	0.640	41.761	1.109	1.373	19.254	1.121	1.057	6.105
	C_S	0.907	1.076	15.683	1.109	0.942	17.679	1.121	1.162	3.519
2	C_E	0.946	0.820	15.412	1.293	1.507	14.186	0.261	0.221	18.145
	C_S	0.946	1.046	9.522	1.293	1.125	14.980	0.261	0.292	10.797
3	C_E	0.826	0.761	8.523	1.045	1.154	9.473	0.794	0.827	3.963
	C_S	0.826	0.994	16.895	1.045	0.762	37.107	0.794	0.709	11.941
4	C_E	0.660	0.388	70.267	0.726	0.948	23.492	0.716	0.748	4.358
	C_S	0.660	0.830	20.423	0.726	0.587	23.595	0.716	0.695	2.913

De acuerdo al proyecto de mezcla en cruceros descrito en la presente tesis, se observan las diferencias que podrían presentarse en una red de distribución de agua para los momentos específicos en los que se presentaría el escenario de dos entradas al crucero y dos salidas del mismo. Ambos modelos de mezcla presentan concentraciones diferentes, en algunos casos el porcentaje de concentración diferente a la salida es superior al 40%.

Esto quiere decir que, utilizando el modelo de mezcla completa, en una simulación de calidad del agua, la distribución de cloro obtenida numéricamente tiende a uniformizarse en la red y mediante el modelo de mezcla no completa, propuesto en el presente proyecto generarían concentraciones de salida más heterogéneas. Con este resultado, se debería pensar que el cloro está concentrado de una manera homogénea en la red y el cloro predomina con cantidad suficiente en la mayor parte de las zonas de la red, con base al modelo de mezcla no completa, la distribución del cloro concentre zonas con mayor cantidad que en otras.

CONCLUSIONES

De acuerdo al estado del arte, ya se han planteado algunos trabajos acerca de la mezcla en cruceros, dirigidos específicamente a analizar la distribución de cloro a las salidas del mismo y a mejorar los esquemas de predicción de riesgos por la intrusión accidental o provocada de contaminante en el agua de las redes. Sin embargo, la gran mayoría de los autores obtuvieron resultados de dispositivos experimentales a escala. Los diámetros y materiales utilizados en los trabajos lograban tratar los caudales en las tuberías para que fluyeran a presión y aunque se lograban casos en régimen turbulento, los valores trabajados del número de Reynolds no rebasaban por mucho a 4000 para sus dispositivos experimentales. Aunque algunos trabajaron con grandes valores de Reynolds únicamente en CFD, no existía una validación suficiente que respaldara las simulaciones.

En este trabajo se presentaron resultados en condiciones mayores de turbulencia en el dispositivo de crucero. Esto fue logrado gracias a las características físicas de la red experimental, del equipo de bombeo y de los dispositivos de medición utilizados. Para analizar la mezcla que ocurre en el crucero bajo estas condiciones de turbulencia, se generaron 12 escenarios que alcanzaron a comprender velocidades de flujo cercanas a los 2.5m/s y presiones 1.96 bar. Es común que estas condiciones se presenten en redes de distribución de agua potable reales.

Antes de comenzar a simular, se realizaron pruebas de validación que permitieron comprobar la representación del modelo en CFD. La validación comprendió la obtención de curvas DTR por medio de la inyección de un pulso de trazador al crucero y analizar la respuesta mediante el equipo de potenciómetro/galvanómetro. Las curvas presentaron una buena aproximación, teniendo valores de RMSE menores a 0.0509. Este valor significa que la distancia promedio de separación en algunos puntos de las curvas lleva a lo máximo 0.0509. Estas separaciones se dieron en la mayor parte en los picos de las curvas. Sin embargo, en las curvaturas ascendente y descendente presentan una similitud muy precisa. En la mayor parte de estas regiones, las pendientes presentan una buena representación, en todas las pruebas de validación.

La variación del coeficiente de Schmidt turbulento Sc_T resolvió muchas cuestiones acerca del papel de la difusión turbulenta y el impacto que genera en estas condiciones de operación. Al variar el número de Schmidt turbulento y comparar los resultados, se percató que las curvas DTR presentaban un cambio mínimo entre ellas. El cambio casi es inapreciable gráficamente. Por lo que se obtuvieron más comprobaciones mediante el error RMSE para cada curva y la variación se aprecia hasta el cuarto decimal de precisión del RMSE. Esto permite concluir que la convección es el principal transporte en especies

diluidas, y que la difusión no repercute mucho en la simulación del curso de trazador a través del crucero. Aún con esto, se comprobó que el modelo propuesto por Kays-Crawford (1997) resultó ser el adecuado al presentar los valores mínimos de RMSE respecto a la variación de Schmidt turbulento.

La selección de malla y la construcción geométrica resultaron adecuadas, debido a que los valores derivados de caudal y velocidad promedio en una superficie de contorno correspondían aproximadamente a los calculados con fórmulas analíticas. Además, los tiempos de simulación no requerían grandes periodos y la convergencia se lograba sin la presencia de curvas quebradas en los gráficos. Los gráficos se pudieron procesar con buen grado de afinidad en la superficie de simetría. La aproximación hidrodinámica conserva poco grado de error respecto a las mediciones experimentales. Los errores se mantuvieron con un promedio de 0.337% general para los doce escenarios. Lo anterior no solo dependió de la simulación en CFD y de la malla, si no de los ajustes de continuidad que se realizaron en las pruebas experimentales. Dichas pruebas ajustadas garantizaron la continuidad en los ensayos, la cual, también se conserva en el ambiente de CFD, puesto que uno de los principios de su codificación se basa en la ecuación de continuidad para tres dimensiones.

Los 12 escenarios propuestos en régimen estacionario para dos entradas y dos salidas de flujo abarcan varias combinaciones que pueden darse en los cruceros. Se variaron las velocidades en las 4 fronteras del crucero, generando ensayos con combinaciones de entrada y salida, una con mayor flujo que otra, y viceversa. También se realizaron combinaciones de concentraciones a las entradas mediante la relación C_{Norte}/C_{Este} , abarcando un total de 108 casos de mezcla.

En los contornos de simetría de los escenarios propuestos se apreciaron zonas de turbulencia en el comienzo del lado adyacente de la tubería en cada una de las salidas (figuras 50 y 51). Esto también se pudo observar en la figura 49, cuando se graficó la difusividad turbulenta y las zonas en las que sus valores tomaron un mayor valor (aunque no impactante en el transporte de especies diluidas).

En el análisis de la mezcla en cruceros se concluye, sin la necesidad de profundizar en números, que la mezcla ocurre de manera heterogénea, prácticamente en todos los casos de concentraciones diferentes a las entradas (el caso de concentraciones iguales es el único que sí funciona como mezcla completa, pero no ciertamente debido a que ocurra una mezcla perfecta, si no que la parte de concentrado que se mezcla, al final posee la misma magnitud de concentración).

El gráfico para la obtención del coeficiente S mediante los doce ensayos (figura 56) asemeja en lo mayor posible el comportamiento de una ecuación lineal de la relación E en todos los casos (excepto el 10). Sin embargo, con el resultante de una curva, para el escenario P10 se concluye que el comportamiento para esta relación E no es una línea recta, si no que tiende a ser una línea con ligera curvatura. Por ahora, se puede considerar que dicho escenario fue el que presentó mayor variación en cuanto a un caudal de entrada respecto al otro. Esto quiere decir que a mayor similitud de caudales de entrada y salida, se tendrá

un comportamiento más lineal, mientras que aquellas variaciones de una entrada/salida respecto a la otra, el gráfico de S será más curvo, y su ascenso/descenso está implicado en cuál frontera tenga el mayor flujo volumétrico.

Los resultados hasta ahora son discretos. La técnica utilizada en este trabajo para la obtención de concentraciones a las salidas, tiene ventajas y desventajas. Respecto a las ventajas: las concentraciones resultantes aproximadas cumplen el principio de continuidad del flujo másico en un cruce (el flujo de masa de entrada en ambas fronteras será igual al flujo de masa de ambas salidas). Esto se debe a que dichas aproximaciones se obtuvieron mediante la ecuación de conservación de flujo másico (62). La implementación del método numérico y su codificación son muy sencillas, una vez conocidas las funciones de aproximación de S (grupo de ecuaciones 61). Y al ser resuelto por un método numérico de aproximación eficiente, dicho parámetro será estimado adecuadamente. Se pueden llegar a tener una gran base de ecuaciones que describan un coeficiente S para encontrar las concentraciones a las salidas, sin embargo. Aproximar una ecuación de 3 dimensiones (velocidad, presión y concentración relacionado al coeficiente E) se podría tener un indicio más preciso, el cual será analizado en la continuación de esta investigación.

Las desventajas acerca de esta técnica son: se depende de que el escenario a estudiar, se aproxime en lo más posible a algunos de los 12 propuestos (o más cuando se realicen más combinaciones). Al no asemejar de manera suficiente dicho escenario, la predicción empezaría a generar un grado mayor de error. Esto no puede ser una desventaja como tal, pero estas funciones están restringidas al rango E [0,2]. Si se mezclan flujos con la relación de concentraciones E fuera de este rango, la predicción sería dispersa. Cabe mencionar que, a su vez, es muy improbable tener casos donde una concentración sea el triple, o 2.5 veces mayor que la otra.

Estos resultados se suman al selecto grupo de investigaciones acerca de la mezcla en cruces. Los resultados describen que se pueden tener más del 40% de diferencia, incluso alcanzar un 70% respecto a la mezcla homogénea. Tener un modelo de mezcla con mayor precisión permitirá incrementar la fiabilidad de los programas de simulación de calidad del agua. No sólo hablando del control del uso de cloro, o de la ubicación de estaciones de reinyección, si no de crear mapas de riesgo por contaminación accidental o inducida a redes de agua potable.

FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Estos ensayos son un buen inicio en la investigación de la mezcla en cruceros. Aunque ya existen aplicaciones (EPANET-BAM, AZRED I y II) que interpretan la mezcla incompleta en cruceros, aún no se ha tenido una aplicación global, ni han sido incorporados al código básico de EPANET, puesto que aún se tienen que realizar más validaciones y existen condiciones en las que dichos modelos no funcionan. Posiblemente como línea de investigación, se proponga analizar a fondo los parámetros a los que depende directamente la mezcla en cruceros.

Lo anterior puede ser analizado observando ahora, por medio de la observación del cómo influye la variación diferencial de la velocidad, la presión y las entradas de caudal en el crucero, entre otros parámetros de entrada (diámetros o geometría interna del crucero, temperatura, longitud del lado recto de tubería, cruceros en doble tee, etc). Además, se puede contemplar la geometría interna del crucero, si los diámetros influyen en los procesos de turbulencia interna y si esto hace sensible al modelo.

La mezcla de cruceros podría repercutir en la localización de estaciones de reinyección de cloro, puesto que, para su determinación en una red a gran escala, se vuelve una busca con un gran número de alternativas.

En dado caso que se llegue a un modelo que represente la mezcla de cruceros de manera precisa. Se implementará como un código que funcione vinculado a EPANET, que contemple una mezcla incompleta y que pueda ser lo más práctica posible. Una aplicación directa reincidentiría en mejorar la precisión de la localización de estaciones de reinyección en redes de agua potable. Al contar con una herramienta que predice con gran aproximación la distribución de cloro en la red, se mejorarán los ambientes en los que emplazar una estación de reinyección mejore las zonas vulnerables por falta o exceso de cloro en el agua.

REFERENCIAS:

AEAAS, *Manual de la cloración, Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento*, Editorial A. E. A. A. S., 01 de Enero de 1984, 32p.

Ahn, J. C., Lee, S. W., Choi, K. Y., & Koo, J. Y. (2012). *Application of EPANET for the determination of chlorine dose and prediction of THMs in a water distribution system*. Sustainable Environment Research, 22(1), 31-38.

Alcocer-Yamanaka, V. H., Tzatchkov, V. G., & Arreguín-Cortés, F. I. *Modelo de calidad del agua en redes de distribución*. Ingeniería hidráulica en México, 19(2), 2004, 77-88.

Al-Jasser, A. O. (2007). *Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect*. Water Research, 41(2), 387-396.

ARA, L. J. G. (2002). *El agua, el cloro y los seres vivos*. Monografías de la Real Academia Nacional de Farmacia.

Arranz de la Peña, J., & Parra Truyol, A. (2014). *Algoritmos Genéticos*. Universidad Carlos III.

Barkin, D. (2006). *La gestión del agua urbana en México*. Universidad de Guadalajara.

Beasley, D., Martin R. R. & Bull, D. R. (1993). *An overview of Genetic Algorithms: Part I. Fundamentals*. University Computing, 15, 58-74.

Boccelli, D. L., Tryby, M. E., Uber, J. G., and Summers, R. S. (2003). *A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions*. Water Research, 37(11), 2654-2666

Castro, P., & Neves, M. (2003). *Chlorine decay in water distribution systems case study—lousada network*. Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry, 2, 261-266.

Coello, C. A. C. (2003). *Introducción a la computación evolutiva (Notas de curso)*. CINVESTAV IPN. Instituto Politécnico Nacional México.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (2007a). *Manual de Agua Potable y Alcantarillado y Saneamiento*. Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Agua Potable. México.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (2007b). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos*. México.

Cortés, N. C. (2000). *Uso de emulaciones del sistema inmune para manejo de restricciones en algoritmos evolutivos*. Master's thesis, Maestría en Inteligencia Artificial, UV-LANIA, Xalapa, Veracruz.

Cunill-García, F., Iborra-Urios, M., & Tejero-Salvador, J. (2010). *Reactores químicos, Apuntes*. Barcelona: Universidad de Barcelona.

Diéguez Alberte, A., Ovejero Málaga, R., & Robledo Ibáñez, A. (2004). *Implementación de juegos usando algoritmos evolutivos*. Notas del curso, Universidad complutense de Madrid.

Ellis Horowitz and Sartaj Sahni. *Fundamentals of Computer Algorithms*. Computer Science Press, Rockville, Maryland, 1984.

Erickson, J. (2012). Moving Mexico Back to Tap Water: Strategies to Restore Confidence in the Water System. *Policy Matters Journal*, 10(1).

Fogel, L. J., Owens, A. J., & Walsh, M. J. (1966). *Artificial intelligence through simulated evolution*.

Fuertes, V. S., García-Serra, J., Iglesias, P. L., López, G., Martínez, F. J., & Pérez, R. (2002). *Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua*. Grupo Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia, España.

Geldreich, E. E. (1996). *Microbial quality of water supply in distribution systems*. CRC Press LLC, ISBN 1-56670-194-5. 504pp.

Gestal Pose, M. G. (2000). *Introducción a los Algoritmos Genéticos*. Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones Universidad de Coruña.

Glover F., Laguna M. (1998) *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Norwell Massachusetts.

Goldberg, D. E. (2006). *Genetic algorithms*. Pearson Education India.

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison wesley, 1989.

Goldberg, D. E., & Deb, K. (1991). *A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms*. Foundations of genetic algorithms, 1, 69-93.

González Piñeros, M. A. (2013). “*Optimización de redes hidráulicas mediante aplicación de algoritmos genéticos y de recocido simulado utilizados en programas comerciales*”. Tesis de Especialidad, Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”, Bogotá, Colombia.

Gramajo Cifuentes B. M. (2004). “*Determinación de la calidad del agua para consumo humano y uso industrial, obtenida de pozos mecánicos en la zona 11, Mixco, Guatemala*”. Tesis de Licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Guimarães, J. R., Ibáñez, J., Litter, M. I., & Pizarro, R. (2001). *Desinfección de agua. Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*, 305-316.

Hallam, N. B., West, J. R., Forster, C. F., Powell, J. C., and Spencer, I. (2002). *The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems*. *Water Research*, **36**(14), 3479-3488.

I. Rodríguez, L. Valdés, J.A. Alfonso, E. Estévez, R. Dopico (2001) .*Uso de técnicas estímulo - respuesta para simular diagnósticos en esófago humano*. Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica. CUBA. Memorias de congreso.

Islam, N., Sadiq, R., & Rodriguez, M. J. (2013). *Optimizing booster chlorination in water distribution networks: a water quality index approach*. *Environmental monitoring and assessment*, 1-16.

Holland, J. H. (1992). Algoritmos genéticos. *Investigación y Ciencia*, 192, 38-45.

Jiménez Magaña, M. R. (2004). “*Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Potable Utilizando un Algoritmo Genético*”, Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

Johnson T., (2010). McClatchy Newspapers. *In Mexico, fear of tap water fuels bottled-water boom*. 27 de mayo de 2010. Recurso en línea (consultado el 05 de Junio del 2015) <http://www.mcclatchydc.com/2010/05/27/94943/in-mexico-fear-of-tap-water-fuels.html>

Kapadia, M. K. (1998). *Modeling chlorine residuals in Water Distribution Network Using EPANET 2.0 software*.

Knobelsdorf Miranda, J., & Mujeriego Sahuquillo, R. (1997). “*Crecimiento bacteriano en las redes de distribución de agua potable: una revisión bibliográfica*”. *Ingeniería del agua*, 1997, vol. 4, núm. 2.

Kumar, R. (2012). Jyotishree, Blending roulette wheel selection & rank selection in genetic algorithms. In *Proceedings of International Conference on Machine Learning and Computing* (Vol. 4, pp. 197-202).

Lansey, K., Pasha, F., Pool, S., Elshorbagy, W., & Uber, J. (2007). Locating satellite booster disinfectant stations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(4), 372-376.

Lipowski, A., & Lipowska, D. (2012). Roulette-wheel selection via stochastic acceptance. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(6), 2193-2196.

Matías Sánchez, A. (2003). “*Diseño de redes de distribución de agua contemplando la fiabilidad, mediante Algoritmos Genéticos*”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España

McJunkin, F. E. (1988). *Agua y salud humana*. Editorial Limusa, S.A. de C.V.

Méndez, M. V. (1995). *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Universidad Católica Andrés.

Merelo, J. J. (2007). *Técnicas heurísticas de resolución de problemas: computación evolutiva y redes neuronales*.

Mora Rodríguez, J.J. (2011) “*Modelación de la intrusión patógena a través de fallos y su implicación en la red de distribución de agua*”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España.

Newell, A., Shaw, J. C., & Simon, H. A. (1959). *The processes of creative thinking*. Santa Monica, CA: Rand Corporation.

NOM-127-SSA1-1994. *Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse para su potabilización*. Diario Oficial de la Federación. 1994.

Omisca, E. (2011). Environmental Health in the Latin American and Caribbean Region: Use of Water Storage Containers, Water Quality, and Community Perception. PhD Thesis. University of South Florida.

Ostle, B. (1979). *Estadística aplicada*. Editorial Limusa.

PAHO (2004) *Manual de tratamiento*. Biblioteca virtual de Desarrollo Sostenible y Salud ambiental.

http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualII/ma2_cap6.pdf (accessed on 21 February 2015).

Pérez Pérez, J. A. (2001). “*Tratamiento de aguas*”. Universidad Nacional, Facultad de Minas, Págs. 167-173

Phillip Cooper, J. (2003). *Development of a chlorine decay and total trihalomethane formation modeling protocol using initial distribution system evaluation data*. Master Thesis, University of Akron. United States of America.

Powell, J. C., Hallam, N. B., West, J. R., Forster, C. F., and Simms, J. (2000). *Factors which control bulk chlorine decay rates*. *Water Research*, 34(1), 117-126.

Pratap, R. (1998). *Getting Started with MATLAB, a quick introduction for scientists and engineers. pp. 240. Foreword by Rudra Pratap. Oxford University Press, Oct 1998. ISBN-10: 0195129474. ISBN-13: 9780195129472, 1.*

del Puerto Rodríguez, A. M., Concepción Rojas, M., & Iglesias Fernández, A. M. (1999). *Calidad del agua y enfermedades de transmisión digestiva*. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 15(5), 495-502.

Quijandría Casanova, S, [en línea]. *Casetas de cloración*. *r-chemical.com*, 2012 [citado el 20 de de Agosto del 2014]. Disponible para World Wide Web: <http://www.r-chemical.com/blog/author/admin/page/2/>

Quirós, F. R. (2005). Desinfección del agua con cloro y cloraminas. *Técnica Industrial*, 260, 55.

Quirós, F. R. (2010). Subproductos generados en la desinfección del agua. *Técnica Industrial*, 288, 47.

Rodríguez Castro, J. A., Pérez Morales, G. B. (2007). “*Apuntes de hidráulica básica*” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Rodríguez, M. J., Rodríguez, G., Serodes, J., & Sadiq, R. (2007). *Subproductos de la desinfección del agua potable: formación, aspectos sanitarios y reglamentación*. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 32(11), 749-756.

Rojas, R. (2002). *Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano*. Lima. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria/Organización Panamericana de la Salud.

Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2: users manual*. Environmental Protection Agency (EPA), United States of America.

Sampson, J. R., & Brindle, A. (1979). Genetic algorithms for function optimization. In *Proceedings of the Ninth Manitoba Conference on Numerical Mathematics and Computing* (pp. 31-47).

Schmid, W. A., & Lazos, R. (2000). *Guía para estimar la incertidumbre de la medición*. Centro Nacional de Metrología. Querétaro. Universidad Nacional Autónoma de México.

Simpson, A. R. (1999). *Modeling of pressure regulating devices: The last major problem to be solved in hydraulic simulation*. In WRPMD'99: Preparing for the 21st Century (pp. 1-9).

Sotelo Avila, G. (1991). *Hidráulica general; fundamentos*. Limusa.

Tejero, I., Jácome, A., Lorda, I., & Santamaría, C. (1995). “*Procesos biopelícula de depuración de aguas residuales: procesos convencionales*”. Medio Ambiente, RETEMA, 45, 68-84.

Willoughby, S. S., & Vogeli, B. R. (1969). *Probabilidad y estadística*. Publicaciones Cultural.

WHO. (1997). *Guidelines for drinking-water quality: recommendations* (Vol. 3). 2nd Ed. World Health Organization.
