



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
DIRECCIÓN DE POSGRADO
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA U. Z

**DIFUSIÓN DE SUSTANCIAS EN REDES
DE TUBERÍAS A PRESIÓN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN
HIDRÁULICA**

P R E S E N T A

ROJACQUES MOMPREMIER



MÉXICO D.F. NOVIEMBRE DE 2009.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D.F. siendo las 18:30 horas del día 22 del mes de Octubre del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A.-U.Z. para examinar la tesis de grado titulada:
"Difusión de Sustancias en Redes de Tuberías a Presión"

Presentada por el alumno:

Mompremier

Rojacques

Apellido paterno

Apellido materno

Nombre(s)

Con registro:

A	0	6	2	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HIDRÁULICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

Dr. Juan Manuel Navarro Pineda

Director de tesis

Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles

Dr. Mario Ulloa Ramirez

M. en C. Pino Durán Escamilla

M. en C. Luis Francisco Sandoval

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

M. en C. Pino Durán Escamilla

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 4 del mes de Noviembre del año 2009, el que suscribe **Rojacques MOMPREMIER** alumno del programa de maestría en Ciencias en Hidráulica con número de registro A062001; adscrito a Escuela Superior de Ingeniería y arquitectura, Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los doctores Óscar Arturo Fuentes Mariles y Juan Manuel Navarro Pineda y cede los derechos del trabajo intitulado: "**DIFUSIÓN DE SUSTANCIAS EN REDES DE TUBERÍAS A PRESIÓN**", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: rojaquesm@yahoo.fr o RMompremier@iingen.unam.mx Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Rojacques Mompremier
Rojacques Mompremier

Dedicatoria

A **DIOS** nuestro
padre celestial
por su amor, su bondad, su misericordia y sobre todo
por ser la **LUZ** que ilumina mi camino.

A mis Padres, Sr Joseph Jacques Mompremier,
Sra Alette J.Mompremier, que me han otorgado valiosos apoyos
Social, espiritual, moral

A mis Hermanos: Roosevelt, Rosenie,
Rose-Urielle
Rodolph, Ronel, Rose-Elmyrne y Adeline
por su cariño.

Agradecimiento

A mi comisión revisora:

Dr. Juan Manuel Navarro Pineda
Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles
Dr. Mario Ulloa Ramírez
M en C Lucio Frago Sandoval
M en C Pino Durán Escamilla

Al **Instituto Politécnico Nacional** por haberme aceptado y brindado todos los apoyos para poder realizar mi maestría.

A mis **admirables profesores** que con sus enseñanzas en el aula forman la conciencia de sus alumnos y nos preparan para, a través del estudio ocupar un lugar importante en la sociedad.

A mi Director de Tesis, **Dr. Juan Manuel Navarro Pineda**, por su sabiduría, su forma de tratar a sus alumnos y por su gran disposición para guiarme y aconsejarme durante el desarrollo de esta tesis.

A mi tutor y Director de tesis, **Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles**, quien dirigió esta tesis brindándome conocimiento, confianza.

Al **Instituto de Ingeniería de la UNAM**, por haber puesto a mi disposición sus instalaciones para desarrollar mi tesis.

Al Subdirector del área de hidráulica: **M I Víctor Franco**.

A la **comisión Nacional del Agua** por haberme permitido realizar mis prácticas profesionales durante 8 meses en sus instalaciones.

A los Ingenieros **Leopoldo Rodríguez y José Antonio Hernández** de la CNA por su apoyo y sus consejos.

A la Dra **Bertude Pierre**.

A la M.I **Claudia Lucía Hernández Martínez**.

A la M.I **Adriana Palma Nava**.

A mis amigos egresados: **Miguel, Arquímedes, Gilberto y Dinorah** por haber estado a mi lado para apoyarme durante toda la carrera.

A mis compañeros del Instituto de Ingeniería, **los M.I Martín Jiménez, Juan Gabriel, Darío, Diego, David, Juan Ansberto, Juan Orozco, Faustino de Luna, Enedino, Jaime, Rojas, José Alberto, Hipólito.**

Al maestro **Juan Javier Carillo Sosa.**

Al M I **Dwinel Belizaire.**

A la M.I **Raquel Teresa Montes Rojas** por su apoyo durante los experimentos de laboratorio.

Al **Sr David** por su valioso apoyo en la construcción de los modelos físicos.

A la M.I **Liliana Vázquez** por su amistad y sus consejos.

A todo el personal del taller de carpintería y metal mecánico.

A mi tío, **Gerard Mompremier.**

A mis tías, **Lucienne Mompremier** y **Chistianne Morisset.**

A mis primos y primas: **Max, Myrlande, Myriame, Myrco.**

A la Ing. **Alexandra orphé** por su valioso apoyo.

A **Tarseline, Tania, Katia, Darline, Modline, Arshlyn, A.J.**

A la Sra **Francisca Alvarez.**

Índice

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Índice general	iv
Glosario de términos	vii
Lista de figuras	x
Lista de tablas	xii
Resumen	xiii
Abstract	xiv

Capítulo 1 Introducción 1

1.1 Justificación	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1.- Objetivo general	4
1.2.2.- Objetivo particular	4
1.3. Especificación del problema	5
1.4. Sistema de abastecimiento de agua	5
1.4.1 Antecedentes	5
1.4.2 Fuentes de agua	6
1.4.3 Aguas meteóricas	6
1.4.4 Aguas superficiales	7
1.4.5 Aguas sub-álveas	8
1.4.6 Aguas subterráneas	8
1.5 Componentes de un sistema de abastecimiento de agua	8
1.5.1 Antecedentes	8
1.5.2 Obras de captación	8
1.5.3 Captación de aguas de lluvias	8
1.5.4 Captación de aguas superficiales	9
1.5.5 Captación de aguas subálveas	10
1.5.6 Captación de aguas subterráneas	10
1.6 Obras de conducción	10
1.6.1 Aspectos a tener en cuenta en obras de conducción	11
1.6.2 Regulación	12
1.6.2.1 Tanques enterrados	12
1.6.2.2 Tanques semienterrados	12
1.6.2.3 Tanques superficiales	13
1.6.2.4 Tanques elevados	13
1.6.3 Tratamiento	14
1.7 Red de distribución	14
1.7.1 Componentes de una red	15
1.7.1.1 Tuberías	15
1.7.1.2 Las juntas	16
1.7.1.3 Las cruces	16
1.7.1.4 Piezas especiales	16
1.7.2 Cálculo de una red	17

1.7.2.1	Método del Instituto de Ingeniería UNAM	17
1.7.2.2	Ecuación de la energía	18
1.7.2.3	Ecuación de continuidad	18
1.7.3	Desarrollo del método del Instituto de Ingeniería UNAM	21
1.7.3.1	Sistema de ecuaciones lineales	22
1.7.4	Diseño de una red	24
1.7.5	Datos necesarios para realizar el diseño	24
1.7.6	Rehabilitación de una red	25
1.7.7	Operación de una red	26
1.7.8	Revisión hidráulica	26
1.8	Cloración	27
1.8.1	Reseña histórica	27
1.8.2	Definición	27
1.8.3	Cloro residual	28
1.8.4	Cloro consumido	28
1.8.5	Reacciones químicas	28
1.8.6	Ventajas de la cloración	28
1.9	Hipoclorito de sodio	28
1.9.1	Definición	28
1.9.2	Forma	29
1.9.3	Reacciones	29
1.9.4	Usos	29
1.9.5	Fórmula de dilución del Hipoclorito de Sodio	29
1.9.6	Síntesis	30
1.9.7	Inestabilidad del hipoclorito de sodio	30
1.9.8	Tabla resumen	32

Capítulo 2 Difusión

2	Definición	33
2.1.	Ecuación de la difusión	34
2.1.1.	Coeficiente de difusión	35
2.2	Ley de Fick	35
2.3	Tipos de difusión	37
2.3.1.	Difusión por reacción	37
2.3.2.	Difusión convectiva	37
2.3.3.	Difusión molecular	38
2.3.4.	Difusión turbulenta	38
2.4	Concentración	38
2.4.1	Balance de masa en la confluencia de varias tuberías	40

Capítulo 3 Comportamiento de la difusión

3	Comportamiento de la difusión de sustancia	41
3.1	Objetivos del experimento	45
3.2	Dispositivo físico en el laboratorio	45
3.2.1	Modelo de los cruces de tuberías	45
3.2.2	Modelo de la red de tuberías	47
3.3	Realización de ensayos en el dispositivo físico	48
3.3.1	Procedimiento de cálculo de concentración	48
3.3.2	Medición de gasto y niveles piezométricos en los cruces	49

3.3.3	Medición de concentración	49
3.4	Resultados de los experimentos en los cruces de tuberías	54
3.5	Interpretación de resultados	64
3.6	Análisis de muestreo de difusión de sustancias	73
3.7	Análisis de resultados	74
3.8	Procedimiento de cálculo de concentración en las salidas	76
3.9	Aplicación de la fórmula desarrollada	77
3.10	Experimentos en la red de agua	78
3.10.1	Medición de gasto en los nudos	78
3.10.2	Medición de concentración	78
3.10.3	Cálculo de gastos en las tuberías	78
3.10.4	Trayectoria del flujo en la red	80
3.10.5	Resultados	81

Capítulo 4 Conclusiones y recomendaciones

4.1	Conclusiones	84
4.2	Recomendaciones	84
	Referencias Bibliográficas	86

Glosario de términos

Acuífero: Es una estructura hidráulica natural que almacena y permite el flujo de agua subterránea a través de ella. Existen en general dos tipos de acuíferos: libres y confinados

Acuíferos confinados: Son cuerpos de agua subterránea contenidos entre dos estratos impermeables por lo que están sujetos a una presión mayor que la atmosférica.

Acuíferos libres: Es aquel acuífero que está a la presión atmosférica y escurre libremente bajo la fuerza que sobre el flujo ejerce la gravedad.

Aforo: Medición del caudal.

Aguas atmosféricas: Estas corresponden al agua proveniente de la atmósfera; como: lluvia, nieve, granizo y escarcha.

Aguas subálveas: Se caracterizan por estar a presión atmosférica, a poca profundidad o relativamente baja y no estar confinadas, pues circulan a través de mantos porosos como arena, grava, tobas poco coherentes y aluviones.

Aguas superficiales: Son aquellas que escurren en los cauces y las que se encuentran almacenamientos naturales.

Aguas subterráneas: Es el agua almacenada o que fluye en el subsuelo. Se clasifican en función de sus condiciones de operación respecto a la presión a la cual está sometida el cuerpo de agua.

Aguas subsuperficiales: Son las que se infiltran a escasa profundidad.

Almacenamiento: Acumulación de agua en un depósito natural o artificial. Durante época de superávit aumenta el volumen de agua en su interior, para compensar el déficit cuando la demanda excede al suministro de agua natural.

Amoebiasis: una infección común entre niños, puede también ocurrir en la gente en su edad del adulto. Es un tipo de gastroenteritis (gastro) causado por un parásito minúsculo, el histolytica del Entamoeba, que infecta el intestino. El movimiento de intestino es afectado por este parásito

Caja rompedora de presión: Estructura contenedora, para comunicar a la conducción con la atmósfera, causa la disminución de la carga piezométrica ejercida sobre la tubería.

Cárcamo de bombeo: Estructura hidráulica diseñada para alojar la cantidad de agua requerida por el equipo de bombeo

Difusión: Movimiento de moléculas de una solución en el fluido desde una región a baja concentración hasta una alta concentración

Difusión de giro: Transferencia de materia debida a los giros turbulentos en un fluido.

Difusión molecular: Transferencia de materia por el movimiento de las moléculas en el seno de un líquido para uniformar las características físicas y químicas.

Difusión turbulenta: Transferencia de materia resultante de la agitación del agua por el viento, normalmente en razón de interacción océano-atmósfera y diferencias fuertes de densidad y enfrentamiento dinámico.

Dispositivos de control de transitorios: Estructuras diseñadas para controlar presiones, burbujas de aire y otras perturbaciones en la conducción, ocasionadas por fenómenos transitorios.

Estación de bombeo: Es la obra electromecánica, hidráulica y civil constituida por una subestación eléctrica, cárcamos de bombeo, rejillas, bombas, equipo eléctrico, tuberías, válvulas y accesorios requeridos para la operación; que proporciona las condiciones energéticas de diseño para que la conducción transporte adecuadamente el agua, de un nivel topográfico generalmente menor en la fuente del sitio de distribución hasta un tanque de regulación o planta potabilizadora.

Esquistomiasis: es una enfermedad parasitaria causada en periodos de inundaciones, por gusanos trematodos del genero *esquistosoma*.

Flujo permanente: También llamado “flujo establecido”, se caracteriza por presencia de un gasto, una carga piezométrica o velocidad constante en el tiempo.

Giardiasis: es una enfermedad diarreica ocasionada por la *Giardia intestinalis* (conocido también como *Giardia lamblia*)

Lagos: Son depresiones de la tierra firme ocupadas por agua. Las lagunas costeras son cuerpos de agua contiguos al océano, muchas veces es agua marina que quedó aislada parcial o totalmente.

Línea de conducción: Tramo de tubería que transporta agua desde la captación hasta la planta potabilizadora, o bien hasta el tanque de regulación, dependiendo de la configuración del sistema de abastecimiento de agua potable.

Manantiales: son las fuentes naturales de agua que brotan de la tierra, puede ser permanente o temporal.

Poliomielitis: es una infección causada por un miembro del género Enterovirus conocido como poliovirus.

Presas: Son muros de piedra u otro material, como concreto; material suelto o granular, que se construyen en ríos, arroyo o canales para almacenar el agua.

Sistema de abastecimiento de agua potable: Es el conjunto de tuberías, instalaciones y accesorios destinados a conducir el agua potable requerida por una población determinada para satisfacer sus necesidades

Sobrepresión y depresión: Son las cargas de presión en exceso y por debajo de la presión a flujo permanente respectivamente, que existen después de presentarse los fenómenos transitorios.

Tanque de regulación: Estructura ubicada y diseñada para almacenar agua acorde con las extracciones variables en tiempo de la fuente de abastecimiento y demandas de los usuarios.

Válvulas: Son dispositivos que permiten el control del flujo en la conducción, atendiendo a situaciones de: corte y control de flujo, acumulación de aire, por llenado y vaciado de la conducción, depresiones generadas por fenómenos transitorios, y retroceso del agua por paro del equipo de bombeo, entre otras.

Lista de figuras

Figura 1.1	Fases del ciclo hidrológico	6
Figura 1.2	Aguas meteóricas	7
Figura 1.3	Agua superficial	7
Figura 1.4	Descripción del sistema de captación de agua pluvial	9
Figura 1.5	Presa de río Segre	9
Figura 1.6	Sistema de perforación para agua subterráneas	10
Figura 1.7	Obras de conducción en conducto cerrado	11
Figura 1.8	Obras de conducción en canal abierto	12
Figura 1.9	Tanque semienterrado	13
Figura 1.10	Tanque superficial	13
Figura 1.11	Tanque elevado	14
Figura 1.12	Esquema básica de una red de agua	15
Figura 1.13	Piezas especiales	16
Figura 1.14	Piezas especiales	16
Figura 1.15	Ecuación de la energía en tubería	18
Figura 1.16	Red de tuberías cerrada	20
Figura 2.1	diagrama de difusión de aire a través de una ventana	34
Figura 2.2	flujo de materia	36
Figura 2.3	Movimiento de masa contenida en una corriente	38
Figura 2.4	Difusión turbulenta	38
Figura 2.5	Esquema de tuberías que se juntan en un nudo	40
Figura 3.1	Diagrama de flujo para el desarrollo experimental (Cruces)	43
Figura 3.2	Diagrama de flujo para el desarrollo experimental (Red)	44
Figura 3.3	Plano de la red del modelo físico	47

Figura 3.4 Interpretación geométrica del escenario 1	55
Figura 3.5 Interpretación geométrica del escenario 2	56
Figura 3.6 Interpretación geométrica del escenario 3	57
Figura 3.7 Interpretación geométrica del escenario 4	58
Figura 3.8 Interpretación geométrica del escenario 5	59
Figura 3.9 Interpretación geométrica del escenario 6	60
Figura 3.10 Interpretación geométrica del escenario 7	61
Figura 3.11 Interpretación geométrica del escenario 8	62
Figura 3.12 Interpretación geométrica del escenario 9	63
Figura 3.13 Presentación del programa Tubo Flu	79
Figura 3.14 Base de datos del programa	79
Figura 3.15 Resultado final de cálculo de gastos en tuberías	80
Figura 3.16 Trayectoria del flujo clorado en la red de agua potable	81
Figura 3.17 Aplicación de resultados de los cruces en la red	82
Figura 6.18 Última prueba en la red de agua potable	83

Lista de tablas

Tabla 1.1 Enfermedades relacionadas con el agua	4
Tabla 1.2 Cálculo del volumen de hipoclorito de sodio	32
Tabla 3.1 Características de la red	47
Tabla 3.2 Resultados de los aforos volumétricos	49
Tabla 3.3 Resultados del escenario 01	55
Tabla 3.4 Resultados del escenario 02	56
Tabla 3.5 Resultados del escenario 03	57
Tabla 3.6 Resultados del escenario 04	58
Tabla 3.7 Resultados del escenario 05	59
Tabla 3.8 Resultados del escenario 06	60
Tabla 3.9 Resultados del escenario 07	61
Tabla 3.10 Resultados del escenario 08	62
Tabla 3.11 Resultados del escenario 09	63
Tabla 3.12 Relación entre los gastos de entrada E1 y E2	67
Tabla 3.13 Concentración en las salidas de cruces de tuberías	67
Tabla 3.14 Relación entre los gastos de entrada E1 y E2	69
Tabla 3.15 Concentración en las salidas de cruces de tuberías	69
Tabla 3.16 Resultado del aforo volumétrico (2ª parte)	73
Tabla 3.17 Resultados de los escenarios 1 al 5 (2ª parte)	74
Tabla 3.18 Resultados de los escenarios 8 al 12 (2ª parte)	75
Tabla 3.19 Comparación entre resultados experimentales y numéricos	77
Tabla 3.20 Resultados de las pruebas en la red de tuberías	81
Tabla 3.21 Resultados en cruces de tuberías en la red de agua potable	83

Resumen

La calidad del agua para consumo humano en las redes de distribución es un asunto que preocupa en los países de todo el mundo, esto por su repercusión en la salud de la población. Preservar la calidad del agua es importante para el abastecimiento de agua potable. La presente investigación tiene como objetivo principal calcular primeramente la concentración del hipoclorito de sodio en un cruce de tuberías a fin de ilustrar las diferencias, lo que conduce a establecer la hipótesis de que existe el mezclado, en segundo termino medir la concentración del hipoclorito de sodio a salida de los nudos en una red de distribución de agua potable para evaluar el porcentaje consumido a lo largo del recorrido en la tubería y por último identificar los puntos de la red donde habrá que re-inyectarse hipoclorito de sodio para así garantizar que el agua suministrada al usuario cumpla con la concentración establecida por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (publicada en el Diario Oficial, el jueves 18 de enero de 1996), acorde con las directrices comunitarias. A nivel internacional, la EPA determina las pautas a seguir en el control de la calidad del agua potable a través de la Safe Drinking Water Act.

Este estudio se realizó en las instalaciones del laboratorio de Hidráulica del Instituto de ingeniería de la UNAM, consistió en el desarrollo de pruebas hidráulicas realizadas para nueve escenarios, mismos que se describen en el capítulo 3, y los cuales consisten en la variación de caudales de agua clorada y agua sin clorar, otras de las variables de este estudio es el diámetro de la tubería de la red, el diámetro y configuración de los cruces de tuberías.

De los resultados obtenidos en esta tesis, puede decirse que para que exista el mezclado de dos corrientes con diferentes concentraciones de hipoclorito de sodio, debe cumplirse la condición de que el flujo que contiene el hipoclorito de sodio debe ser superior al otro flujo.

Los resultados experimentales fueron validados por una fórmula matemática, la cual presenta buenos resultados.

Finalmente de este trabajo se concluye que la relación entre flujo con concentración de hipoclorito de sodio y flujo sin cloración es importante, ya que para que se dé el fenómeno de mezcla es necesario que el caudal clorado sea mayor que el caudal sin clorar.

Abstract

The quality of the water for human consumption in the distribution networks is a subject that worries in the countries worldwide, this by its repercussion in the health of the population. To preserve the quality of the water is important for the potable water supply. The present investigation has as objectives of calculating a part, the concentration of the sodium hypochlorite in the outflow of a pipe crossing to illustrate the errors to which the full mixing hypothesis leads, and other part to measure the concentration of the same substance in the exit of the knots of a drinking water network to evaluate the lost percentage throughout the trajectory of the flow and to identify the points of the network where the will inject chlorine again so that the water arrives at the consumer with the amount of chlorine established by the Official Norm Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (published in the Official Newspaper, Thursday 18 of January of 1996), agreed one with the communitarian directives. At international level, the EPA determines the guidelines to follow in the control of the quality of the drinkable water through the Safe Drinking Water Act.

This study was carried out in the facilities of the Hydraulics' laboratory of the Institute of engineering of the UNAM, consisted of the development hydraulic tests for nine scenes, that are described in chapter 6th, and which consist of the variation of volumes of chlorinated water and water without chlorine, others of the variables of this study are the diameter of the pipe of the network, the diameter and configuration of the crossings of pipes.

With the results obtained in this thesis, the can say that, so that exist the mixed of two flows with different concentrations of sodium hypochlorite, the flow that contains the sodium hypochlorite must be superior to the other flow.

The experimental' results were validated by a mathematical formula, which presents good results.

Finally in this investigation they conclude that the relation between the flow with concentration of hypochlorite of sodium and flow without chlorine is important, since so that mixture's phenomenon occurs is necessary that the chlorinated flow is bigger than the flow without chlorine.

Capítulo 1

Introducción

Las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua de consumo humano tienen una gran repercusión en la salud de las personas. Las medidas destinadas a mejorar la calidad del agua de consumo proporcionan beneficios significativos para la salud.

El agua es esencial para la vida. Las personas deben disponer de un suministro satisfactorio (suficiente y accesible). La mejora del acceso al agua potable puede proporcionar beneficios tangibles para la salud. Debe realizarse el máximo esfuerzo para lograr que la inocuidad del agua sea lo mayor posible. El agua potable según su definición, no ocasiona ningún riesgo a la salud cuando se consume, teniendo en cuenta las diferentes vulnerabilidades que pueden presentar las personas en las distintas etapas de su vida.

La garantía de la inocuidad del abastecimiento de agua de consumo, se basa en la aplicación desde la fuente de abastecimiento al consumidor, de múltiples barreras para evitar la contaminación del agua de consumo o para reducirla a niveles que no sean perjudiciales para la salud.

La calidad del agua se mejora mediante la implantación de barreras como protección de los recursos hídricos, la selección y aplicación correctas de una serie de operaciones de tratamiento, y la gestión de los sistemas de distribución para mantener y proteger su calidad.

En México, los parámetros de calidad que debe cumplir el agua potable están determinados por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (publicada en el Diario Oficial, el jueves 18 de enero de 1996), acorde con las directrices comunitarias. A nivel internacional, la EPA (Environmental Protection Agency) determina las pautas a seguir en el control de la calidad del agua potable a través de la Safe Drinking Water Act.

El siguiente trabajo está conformado de 4 capítulos, con el contenido siguiente:

En el capítulo 1 se indica el por qué de este trabajo. La justificación del trabajo y definición de los objetivos a alcanzar.

Se describen los diferentes elementos de un sistema de abastecimiento de agua potable desde las fuentes al consumidor.

Está integrado por la información de los diferentes elementos que conforman una red de distribución de agua potable. Además se describe los métodos de cálculo de una red. También se desarrollan algunos conceptos importantes como: el diseño, la rehabilitación, la revisión y la operación de una red de distribución.

Se presentan algunos conceptos fundamentales de la cloración, su definición, sus características, algunas reacciones químicas, sus ventajas. También este capítulo se destina a describir el hipoclorito de sodio sustancia que se utilizó para los experimentos de laboratorio.

En el Capítulo 2, se define el tema de difusión, los tipos de difusión. Se desarrollan el coeficiente de difusión, la ecuación de la difusión y la ley de Fick.

En el capítulo 3, se describen las pruebas de laboratorio realizadas en un modelo físico de una red de tuberías construido en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, con el fin de determinar las concentraciones de sustancias en la salida de un cruce de tuberías, y medir la concentración en los nudos de una red de agua potable.

En capítulo 4 se mencionan las conclusiones a las que se llegó en este estudio, finalmente se incluyen las referencias consultadas para la comprensión y realización del trabajo desarrollado, así como los anexos necesarios que complementan el estudio.

1.1 Justificación

“El agua es Vida”, es una frase que se utiliza en Los Estados Unidos de Norteamérica para hablar a cerca de la importancia del agua. Los haitianos la traducen en dos maneras diferentes “L’EAU C’EST LA VIE” en francés y DLO SE LA VI en criollo. Los pueblos latinos de su parte dicen que “EL AGUA FUENTE DE VIDA”.

Si se hace una consulta a los pueblos de la Tierra en cualquier nivel social: residencial, medio y popular a cerca del agua, que sea de raza negra, blanca etcétera se tendrá la misma respuesta “El Agua es indispensable”. Ya que no es posible vivir sin ella. Se necesita para el consumo domestico, en la industria, la agricultura, en los servicios públicos. Sirve también como fuente de inspiración para los músicos, los escritores y los poetas. “Con agua todo, sin ella nada”

Por eso, en un sistema de abastecimiento de agua potable, es indispensable contar con una cantidad de agua suficiente a fin de que los usuarios tengan a su disposición, este líquido vital en cantidad suficiente y **UNA CALIDAD ADECUADA.**

El Agua: No tan buena como la pintan

Alrededor del 80 por ciento de las enfermedades y más de una tercera parte de todas las muertes en los países en desarrollo, están relacionadas con el agua en el mundo. Cada ocho segundos muere un niño por una enfermedad relacionada con el agua. Cada año, más de cinco millones de personas fallecen por dolencias vinculadas a su consumo, la falta de higiene en el hogar o defectos en la canalización. La diarrea, originada en un 30 por ciento de los casos por el agua, causando una grave deshidratación y malnutrición, mata cada año a casi 3 millones de niños menores de cinco años, lo que representa la cuarta parte de muertes en este grupo de edad.

Los patógenos que prosperan en los ambientes acuáticos pueden provocar cólera, fiebre tifoidea, disenterías, poliometitis, hepatitis y salmonelosis. Se

transmiten al beber agua infectada, comer pescado y marisco contaminado, bañarse, nadar o vadear en aguas contaminadas o por insectos y caracoles acuáticos.

La esquistomiasis mata cada año a unas 20.000 personas. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se contrae al lavarse o bañarse en ríos, lagos o canales infectados. Un gusano denominado esquistosoma penetra por la piel, llega a la sangre y se instala en los vasos sanguíneos de los intestinos o la vejiga causando; en Egipto, un tipo de cáncer de vejiga que es la principal causa de muerte para los hombres menores de 44 años.

Unos 200 millones de personas de Asia, África y Latinoamérica sufren giardiasis, una infección intestinal que se transmite sobre todo por el consumo de agua contaminada por heces. Causa diarrea, dolores abdominales y pérdida de peso. Cada año se registran unos 500.000 nuevos casos, la mayoría en niños.

En la actualidad, el cólera, el tifus y la disentería son raros en los países industrializados. No así en los países en vías de desarrollo, donde cada año se registran unos 16 millones de casos de cólera y 120.000 defunciones por esta enfermedad. Un 80 por ciento de los casos y muertes por cólera se registran en Asia. También tiene una alta incidencia en África y Latinoamérica.

En Estados Unidos, las enfermedades provocadas por microorganismos transmitidos por el agua, disminuyeron a una milésima parte durante el último siglo. Aun así, la Agencia de Protección Ambiental de EE UU, calcula que las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua cuestan al país unos 9.700 millones de dólares al año. En 1993, la contaminación del suministro de agua de Milwaukee hizo enfermar a más de 400.000 personas, de las que murieron 104. El desastre costó a la ciudad unos 150 millones de dólares.

En 1991 se consideró que el agua vertida por un carguero chino era la culpable de haber introducido la estirpe asiática del cólera en aguas de Perú. Se cree que, después del vertido, las bacterias se propagaron rápidamente en el ecosistema marino, infectando al plancton y llegando hasta la población humana a través del consumo de agua, pescado y mariscos contaminados. Transcurridos dos años del vertido, se habían registrado más de 500.000 casos de cólera en toda América Latina, 200.000 de ellos en Perú.

De acuerdo a un estudio realizado por Medicus Mundi en Gugerat, un estado situado en el oeste de la India, el agua de los pozos analizados presentaba un alto grado de contaminación fecal, responsable de la alta prevalencia de parásitos en la zona. Se analizó a más de 200 personas y resultó que el 87,3 por ciento estaba infectado con parásitos intestinales. Un 85,3 portaba parásitos patógenos.

En la siguiente tabla, se presenta una lista de enfermedades relacionadas con el uso de agua contaminada publicada por la Organización Mundial de la Salud, el número de caso detectado por año asociado con la cantidad de muertos.

ENFERMEDADES RELACIONADAS CON EL AGUA		
Enfermedades	Casos registrados por año	Decesos por año
Cólera	384000	11000
Tifoidea	500000	25000
Giardiasis	500000	
Amoebiasis	48000000	110000
Diarrea	1500000000	4000000
Ascariasis	1000000	20000

Tabla 1.1 Enfermedades relacionadas con el agua
(Fuente, Organización mundial de la salud, OMS)

Como los riesgos para la salud asociados al consumo de agua son severos a través del mundo, desarrollar una serie de estudios e implementar una serie de medidas para garantizar la potabilidad del agua se vuelve una necesidad. El presente trabajo radica, en realizar un estudio de la difusión de una sustancia disuelta (hipoclorito de sodio) en una red de agua potable. Se usa el hipoclorito de sodio porque no sólo es uno de los desinfectantes más efectivos para el agua potable, sino también uno de los más baratos. Es muy eficaz contra las bacterias relacionadas con enfermedades transmitidas por el agua. Esta tesis no solo pretende cumplir con los objetivos planeados posteriormente, sino también se requiere que sea un apoyo para las actividades relacionadas al tratamiento del agua en un estudio de abastecimiento de agua potable.

1.2 Objetivos

1.2.1.- Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo general estudiar la propagación de una sustancia (cloro) en el agua que fluye en una red de tuberías de distribución de agua potable para determinar su concentración. Su aplicación principal se refiere a la determinación de la concentración de cloro residual en distintos puntos de dicha red, en cualquier momento del día tomando en cuenta el cambio temporal de los gastos que circulan en sus tuberías.

Con base de un modelo físico, se estima la concentración de cloro en distintas zonas para revisar si el cloro residual es mayor al requerido; además se encuentran las zonas de la red donde se alcanza a difundir adecuadamente y se ubican los puntos de la red donde exista déficit o bien exceso de cloro.

1.2.2.- Objetivo particular

Estimar la concentración del hipoclorito de sodio en la salida de un cruce de tuberías.

1.3.- Especificación del problema

El agua es un recurso renovable; sin embargo puede llegar a estar tan contaminada por las actividades humanas que ya no sea útil, sino más bien nocivo. La problemática de la contaminación del agua se concentra en:

Agentes patógenos.- Bacterias, virus, protozoarios, parásitos que entran al agua proveniente de desechos orgánicos.

Desechos que requieren oxígeno.- Los desechos orgánicos pueden ser descompuestos por bacterias que usan oxígeno para biodegradarlos. Si hay poblaciones grandes de estas bacterias, pueden agotar el oxígeno del agua, matando así las formas de vida acuáticas.

Sustancias químicas inorgánicas.- Ácidos, compuestos de metales tóxicos (Mercurio, Plomo), envenenan el agua.

Los nutrientes vegetales pueden ocasionar el crecimiento excesivo de plantas acuáticas que después mueren y se descomponen, agotando el oxígeno del agua y de este modo causan la muerte de las especies marinas (zona muerta).

Sustancias químicas orgánicas.- Petróleo, plásticos, plaguicidas, detergentes que amenazan la vida.

Sedimentos o materia suspendida.- Partículas insolubles de suelo que enturbian el agua, y que son la mayor fuente de contaminación.

Sustancias radiactivas que pueden causar defectos congénitos y cáncer.

Calor.- Ingresos de agua caliente que disminuyen el contenido de oxígeno y hace a los organismos acuáticos muy vulnerables.

Para poder garantizar la calidad de una agua potable, se requiere clorar a ésta y la concentración del cloro en el agua debe de estar dentro los límites permitidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (publicada en el Diario Oficial, el jueves 18 de enero de 1996), para lo cual se utilizó un modelo físico hidráulico para conocer la difusión del cloro inyectado a lo largo de esta red.

1.4. Sistema de abastecimiento de agua potable

1.4.1. Antecedentes

El ciclo hidrológico es un proceso del movimiento del agua en el planeta. No tiene principio ni fin. Su descripción puede iniciar en cualquiera de sus etapas, por ejemplo con la evaporación del agua desde la superficie del océano. A medida que se eleva, el aire humedecido se enfría y el vapor se transforma en agua: es **la condensación**. Las gotas se juntan y forman una nube. Luego, caen por su propio peso: es **la precipitación**. Si en la atmósfera hace mucho frío, el agua cae como nieve o granizo. Si es más cálida, caerán gotas de lluvia. Una parte del agua que llega a la tierra será aprovechada por los seres vivos; otra escurrirá por el terreno hasta llegar a un río, un lago o el océano. A este fenómeno se le conoce como **escorrentía**. Otro poco del agua se filtrará a través del suelo, formando capas de agua subterránea. Este proceso es la percolación. Más tarde o más temprano, toda esta agua volverá nuevamente a la atmósfera, debido principalmente a la evaporación.

Al evaporarse, el agua deja atrás todos los elementos que la contaminan o la hacen no apta para beber (sales minerales, químicos, desechos). Por eso el

ciclo del agua entrega un elemento puro. Pero hay otro proceso que también purifica el agua, y es parte del ciclo: la transpiración de las plantas.

Las raíces de las plantas absorben el agua, la cual se desplaza hacia arriba a través de los tallos o troncos, movilizándolo consigo a los elementos que necesita la planta para nutrirse. Al llegar a las hojas y flores, se evapora hacia el aire en forma de vapor de agua. Este fenómeno es **la transpiración**.

A continuación, en la figura 1.1 se resumen las fases del ciclo hidrológico.

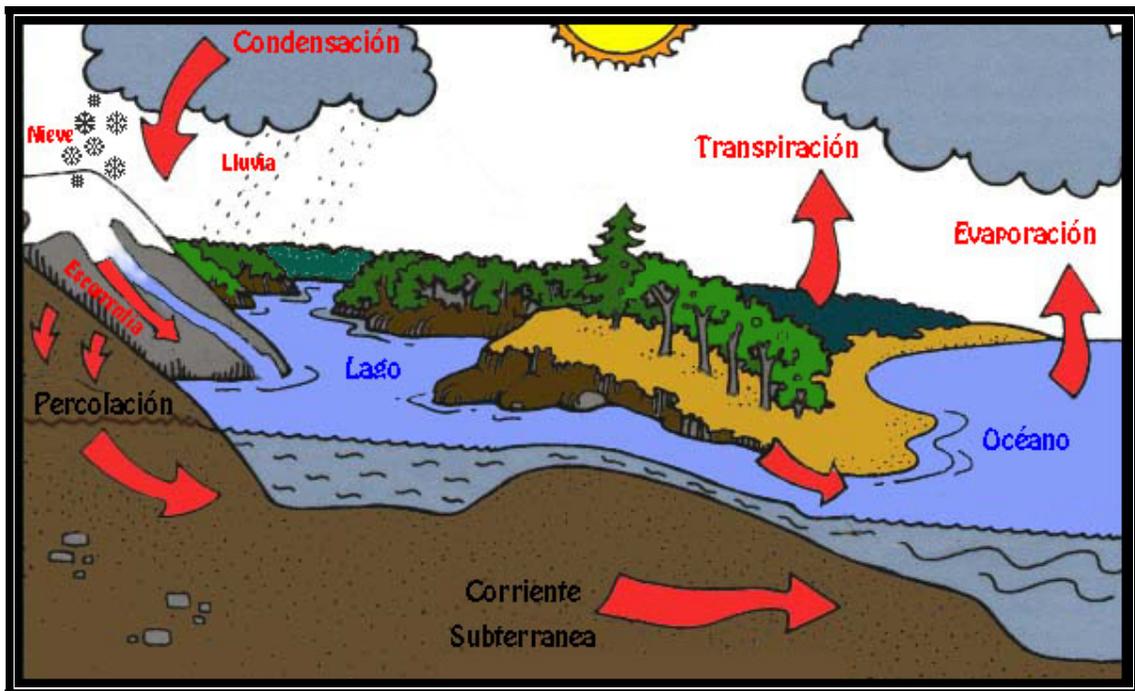


Figura 1.1 Fases del ciclo hidrológico

1.4.2. Fuentes de agua

De acuerdo a la forma en que se encuentra en la naturaleza, las distintas fuentes de provisión de este líquido son las siguientes:

1. Aguas Meteoricas
2. Aguas Superficiales
3. Aguas Subálveas
4. Aguas Subterráneas

1.4.3. Aguas meteóricas

Para el caso de comunidades rurales o pequeñas poblaciones aparece como posible fuente de provisión la captación de aguas de lluvia, la que debe ser recogida sobre el terreno preparado adecuadamente, ver Figura 1.2.

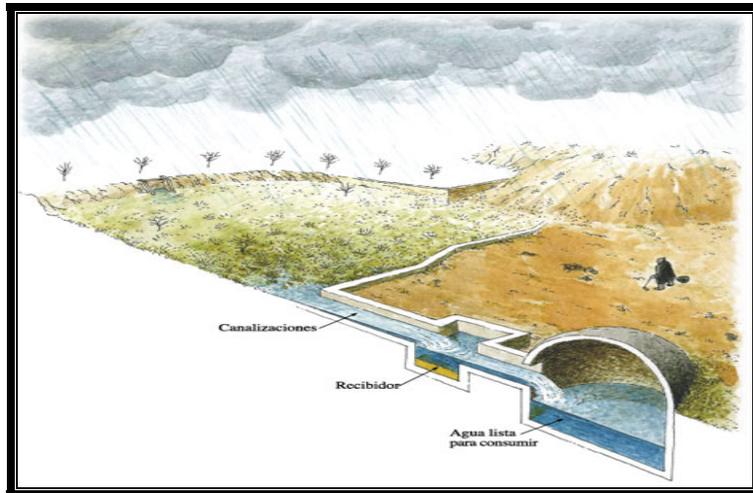


Figura 1.2 Aguas meteóricas

1.4.4. Aguas superficiales

Se denominan así a las aguas provenientes de los ríos, arroyos, lagos, ver la figura 1.3. En México las aguas superficiales proveen a más del 70 % de la población. Son en general aguas turbias y con color, y además, por ser superficiales están sujetas a contaminarse. Por estas causas exigen tratamiento potabilizador, incluido desinfección previa a su entrega para su consumo.



Figura 1.3 Agua superficial

1.4.5. Aguas Subálveas

Son las aguas que corren por el subálveo del río. Se captan en general mediante pozos filtrantes o galerías filtrantes. Son en general aguas de muy buena calidad ya que han sufrido un proceso natural de filtración.

1.4.6- Aguas subterráneas

El agua subterránea se encuentra normalmente empapando materiales geológicos permeables, que constituyen capas o formaciones a los que se les denominan *acuíferos*.

Un *acuífero* es aquella área bajo la superficie de la tierra donde el agua de la superficie (p. ej. lluvia) se almacena.

1.5- Componentes de un sistema de abastecimiento de agua potable

1.5.1- Antecedentes

La enumeración de los componentes de un sistema de abastecimiento de agua guarda relación con los procesos de potabilización necesarios a realizar al agua antes de la entrega al consumo. Las aguas provenientes de fuentes subterráneas profundas y de galerías filtrantes no necesitan ningún procedimiento de purificación, siempre que el agua sea química y microbiológicamente apropiados. En estos casos, solo se recomienda el tratamiento con cloro para resguardarlas de cualquier contaminación accidental en la red de distribución.

En cambio, las aguas provenientes de fuentes superficiales no presentan condiciones físicas ni microbiológicas adecuadas. Por lo tanto es necesario proceder a su potabilización antes de su consumo.

La enumeración de los componentes se hará a continuación, y se refiere a la utilización de un agua superficial, indicando en cada caso la finalidad que tiene cada uno de los componentes.

1.5.2- Obras de Captación

Son las obras necesarias para captar el agua de la fuente de abastecimiento a utilizar y pueden hacerse por gravedad, aprovechando la diferencia de nivel del terreno o por impulsión (bombas). Las dimensiones y características de las obras de toma deben permitir la captación de los caudales necesarios para un suministro seguro a la población. Más adelante se verán los distintos tipos de obras de toma para cada una de las fuentes descritas.

1.5.3- Captación de agua de lluvias

Los sistemas de captación de agua o sistemas de cosecha de agua tienen como propósito recolectar el agua proveniente de la lluvia para su utilización. Su aplicación doméstica consiste en sistemas colocados en el techo de la casa donde captan el agua y luego es drenada a través de conductos para luego almacenarse en un tanque o cisterna. Existen sistemas de fabricación sencilla que no requieren la participación de expertos y se utiliza material disponible

localmente. El agua de lluvia recolectada se puede utilizar para la ducha, lavamanos e inodoros, incluso combinando el sistema con filtros puede utilizarse también para consumo humano. Ver Figura 1.4.



Figura 1.4 Descripción del sistema de captación de agua pluvial

1.5.4- Captación de aguas superficiales:

Son consideradas con esta denominación las aguas de los ríos, lagos y arroyos, ver la figura 1.5. Los aspectos fundamentales de este tipo de captación son la elección del tipo de toma a construir y la ubicación de la misma. En general las obras de toma deben satisfacer las siguientes exigencias básicas:

- Responder en todo momento a las situaciones cambiantes del curso de agua
- Tener una estructura adaptada al choque de la corriente líquida, al impacto de las embarcaciones, de objetos flotantes y material de arrastre.
- En cualquier condición del río debe permitir captar el caudal de diseño.

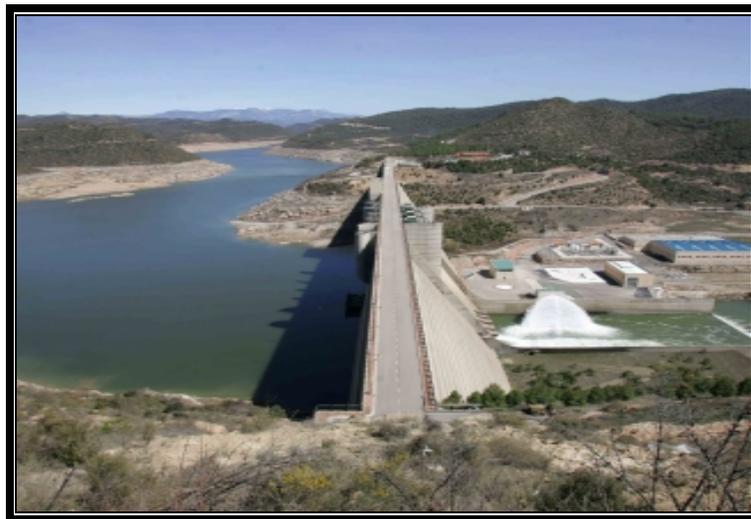


Figura 1.5. Presa del río Segre OLIVER DUCH

1.5.5- Captación de agua subálveas

Estas aguas se captan mediante pozos a cielo abierto, galerías filtrantes o mediante sistemas de puyones, o pozos Ranney, un ejemplo claro de aprovechamiento de esta agua son los pozos emplazados en el subálveo de cauces superficiales, sobre todo aquellos casos en los que el acuífero es alimentado por la corriente.

1.5.6- Captación de agua subterráneas

La explotación de agua subterránea requiere de equipos bomba-motor y pozos que puedan ser perforados o excavados (a cielo abierto), con profundidades variables por lo que se deben usar desde pequeñas motobombas para gastos bajos, hasta equipos de gran potencia para grandes caudales. En la figura 1.6 se muestra un equipo elaborado con altos estándares de calidad y aplicación de tecnología en variados sistemas de perforación de pozos.



Figura 1.6. Sistema de perforación para agua subterránea

1.6- Obras de conducción

Tienen por finalidad transportar de las obras de captación hasta la planta de tratamiento, o desde esta planta hasta la ciudad para su distribución. La obra de conducción puede ser un canal abierto o por conducto cerrado. Si se transporta agua sin tratar, la conducción puede ser a canal abierto. En cambio, si se conduce agua tratada ello debe hacerse por conducto cerrado, para de esta forma preservarla de la contaminación.

1.6.1- Aspectos a tener en cuenta en obras de conducción.

Los principales aspectos a tener en cuenta en las obras de conducción son las siguientes

1. Desnivel existente: puede ser negativo o positivo. Hay que tener en cuenta las pérdidas de carga.
2. Distancia: para grandes distancias y terrenos accidentados deben estudiarse varias variantes y adoptar la más económica. Debe tenerse en cuenta que la ruta más corta no es necesariamente la más económica. Para estos casos, las obras de conducción influyen grandemente en el costo final. En la figura 1.7, se muestra una imagen de las obras de conducción de agua desde el Trasvase Tajo-Segura a la Llanura manchega.



Figura 1.7 Obras de conducción en conducto cerrado

En la figura, 1.8, se observa otra obra de captación, como se había mencionado anteriormente a cerca de los tipos de entrega, a diferencia de la obra de figura 1.7, que fue un conducto cerrado, esta es el canal “Coranchay-Marisol”, obra de infraestructura de riego mayor ubicada a más 3,800 metros sobre el nivel del mar en la provincia de Candarave, que tiene como objetivo reducir las pérdidas de conducción de agua por filtración, aportando con recurso hídrico para el riego de aproximadamente 3,597 hectáreas netas de las zonas andinas.

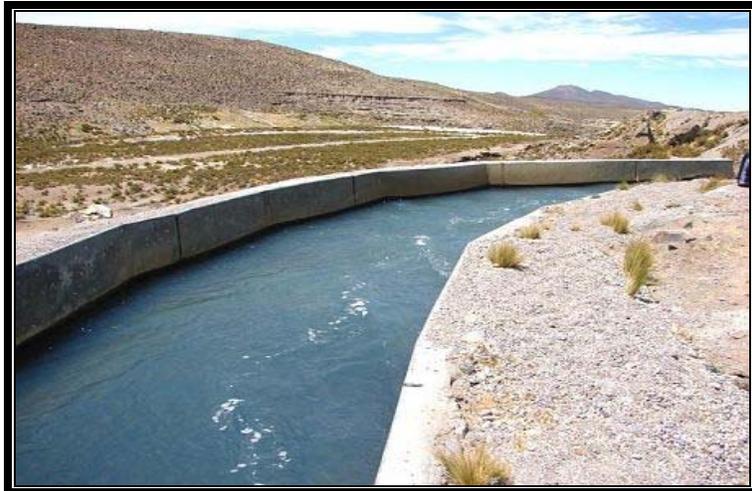


Figura 1.8 Obras de conducción en canal abierto

1.6.2- Regulación

El tanque de regulación es la parte del sistema de abastecimiento de agua potable que recibe un gasto desde la fuente para satisfacer las demandas variables de la población a lo largo del día; permite almacenamiento de un volumen de agua cuando la demanda en la población es menor que el gasto de llegada y el agua almacenada se utiliza cuando la demanda es mayor.

Cuando además de la regulación se proporciona un volumen adicional para almacenar agua en el tanque se dispone entonces de una cantidad como reserva con el objeto de no suspender el servicio en caso de desperfecto de la captación o en la conducción; el volumen de agua reservada generalmente se utiliza para satisfacer demandas extraordinarias, como es el caso de combate a incendios.

La selección del tipo de tanque depende del material en la región, de las condiciones topográficas y de la disponibilidad de terreno.

1.6.2.1- Tanques enterrados

Estos tanques se construyen bajo el nivel del suelo. Se emplean preferentemente cuando existe terreno con una cota adecuada para el funcionamiento de la red de distribución y de fácil excavación.

1.6.2.2-Tanques semienterrados

Los semienterrados, tiene parte de su estructura bajo el nivel de terreno y parte sobre el nivel del terreno. Se emplean generalmente cuando la altura topográfica respecto al punto de alimentación es suficiente y el terreno presenta dificultad de excavación, ver la figura 1.9.

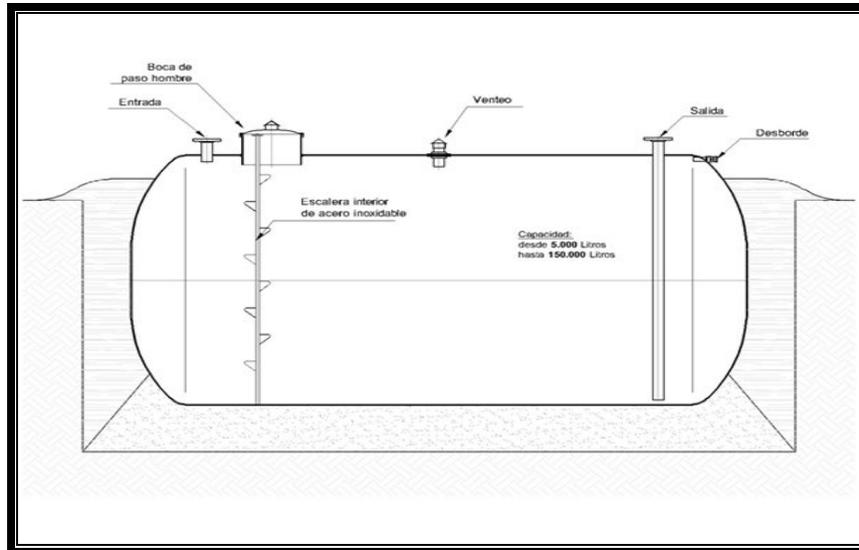


Figura 1.9 Tanque semienterrado

1.6.2.3- Tanques superficiales

Son tanques construidos sobre la superficie del terreno y se sitúan en una elevación natural, ver la figura 1.10.



Figura 1.10 Tanque superficial

1.6.2.4- Tanques elevados

Son aquellos cuya base esta por encima del nivel del suelo, ver la figura 1.11.



Figura 1.11 Tanque elevado

Cabe mencionar que los tanques de regulación tienen por objeto cambiar un régimen de aportaciones (de la conducción) que es constante a un régimen de consumo o demandas (de la red de distribución) que siempre es variable. El tanque debe proporcionar un servicio eficiente bajo normas estrictas de higiene y seguridad, procurando que su costo de inversión sea mínimo.

1.6.3- Tratamiento

El término “tratamiento”, se refiere a todos aquellos procesos que de una u otra manera sean capaces de alterar favorablemente las condiciones del agua.

Para que el agua que se capta en embalses, pozos, lagos, etcétera; sea adecuada para el consumo humano, la mayor parte de las veces es necesario tratarla convenientemente para hacerla potable. Este proceso se denomina potabilización y se realiza en las plantas potabilizadoras. Existen diferentes métodos y tecnologías de potabilización, aunque todos ellos constan, más o menos, de las siguientes etapas:

Precloración y floculación. Después de un filtrado inicial para retirar los fragmentos sólidos de gran tamaño, se añade cloro (para eliminar los microorganismos del agua) y otros productos químicos para favorecer que las partículas sólidas precipiten formando copos (flóculos).

Decantación. En esta fase se eliminan los flóculos y otras partículas presentes en el agua.

Filtración. Se hace pasar el agua por sucesivos filtros para eliminar la arena y otras partículas que aún pudieran quedar, eliminando a la vez la turbidez del agua.

Cloración y envío a la red. Para lograr la desinfección del agua y las tuberías de la red de distribución.

1.7- Red de distribución

Una red de distribución es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de servicio o de distribución hasta la toma

domiciliaria o a hidrantes públicos. Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, público, comercial, industrial y para condiciones extraordinarias como el extinguir incendios.

Los esquemas básicos o configuraciones de la red se refieren a la forma en la que se trazan las tuberías de la red para abastecer de agua a la toma domiciliaria. Se tienen tres posibles configuraciones de la red: cerrada, abierta y combinada.

Antes de definir las posibles configuraciones de la red es conveniente definir qué es un circuito. Un circuito es un conjunto de tuberías conectadas en forma de polígono donde el agua que parte de un punto puede volver al mismo después de fluir por las tuberías que lo componen, ver la figura 1.12.

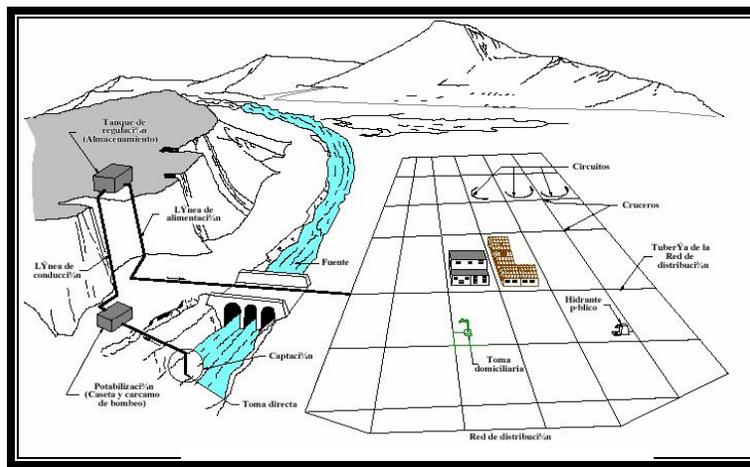


Figura 1.12 Esquema básico de una red de agua potable

Para el análisis hidráulico de las redes, se les clasifican como redes primarias y secundarias.

La red primaria permite conducir el agua por medio de líneas troncales o principales y alimentar las redes secundarias. Se considera que el diámetro mínimo de las tuberías correspondientes a la red primaria es 100 mm. Sin embargo, en colonias urbanas populares se puede aceptar de 75 mm y en zonas rurales hasta 50 mm, aunque en grandes urbes se puede aceptar a partir de 500 mm. La red secundaria distribuye el agua propiamente hasta la toma domiciliaria.

1.7.1- Componentes de una red

En los siguientes apartados se describe cada uno de los componentes de una red.

1.7.1.1- Tuberías

Se le llama así al conjunto formado por los tubos (conductos de sección circular) y su sistema de unión o ensamble. Para fines de análisis se domina tubería al conducto comprendiendo entre dos secciones transversales del mismo.

1.7.1.2- Las juntas

Se utilizan para unir dos tuberías, las de metal pueden ser de varios tipos, por ejemplo Gibault, Dresser, etcétera.

1.7.1.3- Las cruces

Se utilizan para unir conductos, donde las cuatro uniones pueden ser del mismo diámetro, o dos mayores de igual diámetro y dos menores de igual diámetro. En el segundo caso se llama cruz reducción.

1.7.1.4- Piezas especiales

Son elementos de unión entre los componentes de una conducción de agua, se utilizan para efectuar intersecciones de conductos variación de diámetro, cambios de dirección, conexiones con válvulas y equipos de bombeo, etcétera. Este grupo es constituido por juntas, carretes, extremidades, tes, codos y reducciones entre otros, ver las figuras 1.13 y 1.14.



Figura 1.13 Piezas especiales



Figura 1.14 Piezas especiales

1.7.2- Cálculo de una red

Aquí se describen los aspectos de un método de cálculo de red de distribución de agua potable del Instituto de Ingeniería de la UNAM. (Sánchez y Fuentes, 1991). Cabe mencionar que desde hace mucho tiempo, el cálculo de una red ha sido una tarea que llama la atención de varios científicos, entre ellos Hardy Cross quien desarrolló su método. También se desarrollaron y utilizaron el método de la teoría lineal, el de Newton Raphson y muchos otros.

A parte de de estos métodos, hoy en día existen varios programas en computadoras que nos ayudan a hacer esta tarea. Dentro de paquetes de cómputo de redes más empleados en México se encuentran los códigos CYBERNET y HAPE V. El primero, desarrollado en Estados Unidos de America, por la Agencia de Protección ambiental (EPA) ya hace una década, (hacia 1993), se maneja bajo el ambiente de AUTOCAD. El segundo, creado en México por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 1997), ambos del tipo de periodos extendido.

1.7.2.1- Método del Instituto de Ingeniería, UNAM

El método de cálculo (Fuentes y Sánchez, 1991) se basa en los principios de conservación de cantidad de masa y energía.

Este método tiene como propósito llegar a un sistema de ecuaciones lineales cuyas incógnitas son $\{h^{k+1}\}$, del tipo $A \{h^{k+1}\} = B$

donde,

A: Matriz de coeficientes del sistema de ecuaciones (depende de los parámetros α^k),

$\{h^{k+1}\}$: Vector incógnitas

B: Vector de términos independientes (depende de $q/2$, k y h).

Para llegar a esta matriz se emplea el desarrollo en serie de Taylor que incluye hasta la derivada de la función de primer orden.

1.7.2.2- Ecuación de la energía en una tubería de la red.

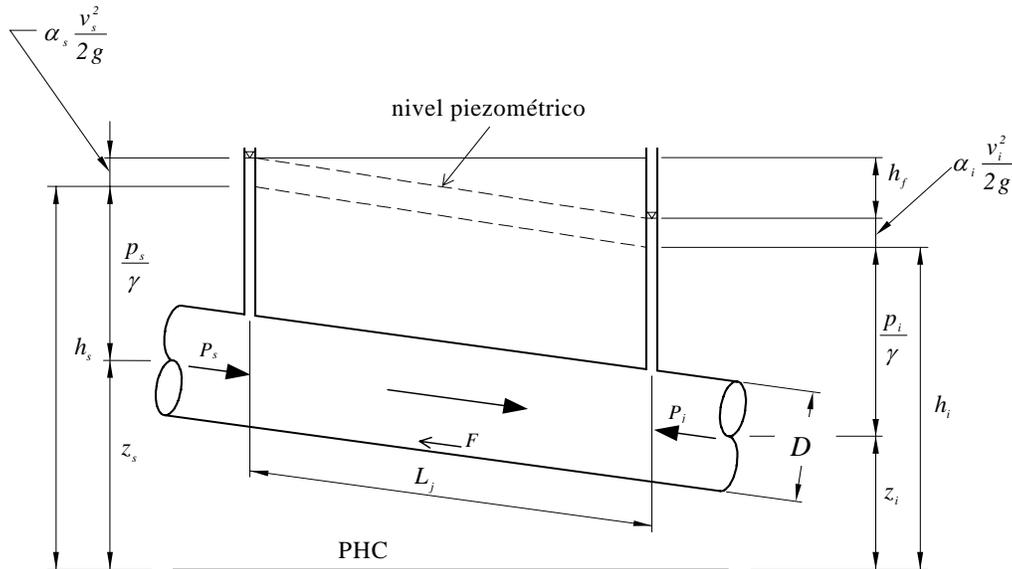


Figura 1.15 Ecuación de la energía en tubería J de la red.

Como se observa en la figura 1.15, al utilizar el concepto de la ecuación de la conservación de la energía entre secciones, se tiene

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \sum_1^2 h_r \quad (1.1)$$

En esta ecuación z , representa la elevación respecto a un plano horizontal de referencia, p y v la presión y la velocidad media respectivamente en el punto en el centro de la sección, α es el coeficiente de Coriolis, γ y g son los pesos específicos del fluido y la aceleración de la gravedad respectivamente, h_f es la pérdida de la energía hidráulica debido al rozamiento del fluido con las paredes del conducto.

$\frac{P}{\gamma}$ carga de presión, (m), $\alpha \frac{V^2}{2g}$ carga de velocidad (siendo α el coeficiente de Coriolis, que toma en cuenta la variación de la velocidad real con respecto a la velocidad media, de la sección transversal en estudio), (m).

$\sum_1^2 h_r$ pérdida de carga entre las secciones 1 y 2, (m).

1.7.2.3- Ecuación de continuidad

A la ecuación de la conservación de masa para un volumen de control infinitesimal a menudo se le denomina ecuación de continuidad porque no requiere más suposición que de la continuidad de las funciones que dan la densidad y la velocidad.

La ecuación de continuidad establece que en una tubería de la red (Dario E. Guaycochea G en su libro intitulado Flujos en tubos a presión), se tiene:

$$A_s v_s = A_i v_i \quad (1.2)$$

para una tubería con área de sección transversal constante ($A_s = A_i = A$), de la ecuación 3.2 (1.2) resulta que $v_s = v_i = v$ siendo $\alpha_i=1$ y $\alpha_s=1$, resulta que

$$h_f = h_s - h_i$$

Al tomar en cuenta a la ecuación anterior en la pérdida

$$h_s - h_i = C|Q|Q \quad (1.3)$$

Al expresar el gasto que circula por la tubería en función de las cargas, se obtiene

$$Q = \begin{cases} k(h_s - h_i)^{1/2} & \text{si } h_s \geq h_i \\ -k(h_i - h_s)^{1/2} & \text{si } h_s < h_i \end{cases} \quad (1.4)$$

En la ecuación 1.4 se considera k como

$$k = \left(\frac{I}{C} \right)^{1/2} \quad (1.5)$$

Como ejemplo, se emplea la ecuación de continuidad en la unión de varias tuberías; considérese la red de la figura 1.16 donde se conoce la carga en el nudo 5. Se han numerado los nudos y las tuberías, distinguiendo a estos últimos con números encerrados en un círculo. También aparecen con flechas los gastos (q) que egresan de (o ingresan a) la red y los gastos (Q) que fluyen en las tuberías, para estos últimos se ha supuesto el sentido de flujo.

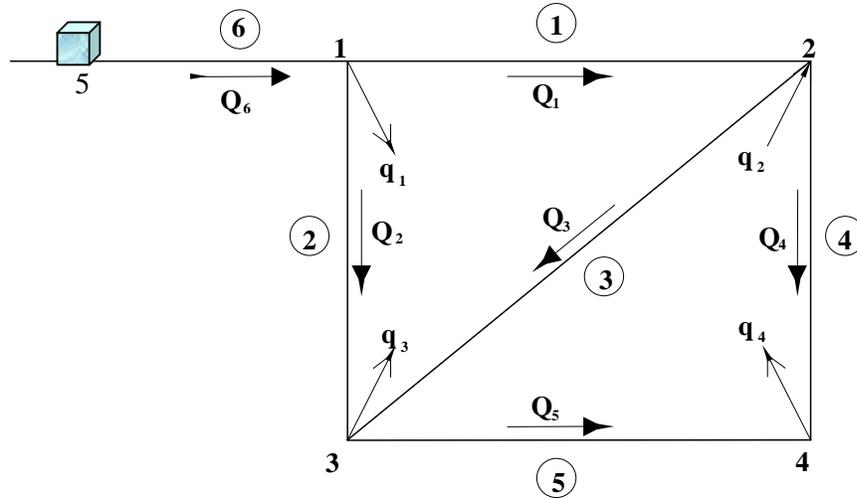


Figura 1.16 Red de tuberías cerrada

Así, al aplicar el principio de continuidad en los nudos 1 al 4 se establece el sistema de ecuaciones siguiente:

$$\begin{aligned}
 -Q_1 - Q_2 + Q_3 &= q_1 \\
 Q_1 - Q_3 - Q_4 &= -q_2 \\
 Q_2 + Q_3 - Q_5 &= q_3 \\
 Q_5 + Q_4 &= q_4
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

El sistema de ecuaciones correspondiente a cualquier red se puede escribir como:

$$\sum Q_j = q_n
 \tag{1.7}$$

donde la suma de todas las tuberías j conectadas al nudo n , Q_j es el gasto que fluye por la tubería j y q_n es el gasto que sale por el nudo n .

Al sustituir a la ecuación 1.4 en las ecuaciones 1.7 se forma un sistema no lineal de ecuaciones

Por ejemplo, al expresar los gastos Q_1 a Q_5 en función de las cargas mediante las ecuaciones 1.4 y sustituir en las ecuaciones 1.6 se obtiene:

$$\begin{aligned}
 -k_1(h_1 - h_2)^{1/2} - k_2(h_1 - h_3)^{1/2} + k_3(h_5 - h_1)^{1/2} &= q_1 \\
 k_1(h_1 - h_2)^{1/2} - k_3(h_2 - h_3)^{1/2} - k_4(h_2 - h_4)^{1/2} &= q_2 \\
 k_2(h_1 - h_3)^{1/2} + k_3(h_2 - h_3)^{1/2} - k_5(h_3 - h_4)^{1/2} &= q_3 \\
 k_5(h_3 - h_4)^{1/2} - k_4(h_2 - h_4)^{1/2} &= q_4
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

Se trata de un sistema de ecuaciones no lineales que tiene como incógnitas a h_1 , h_2 , h_3 y h_4 (en el nudo 5 la carga es conocida, y sirve como nivel de referencia para las demás).

También es posible establecer las ecuaciones del sistema anterior de manera que expresándolos de modo general se tiene:

$$\sum F_j(h_s, h_i) = q_n \quad (1.9)$$

donde la suma se efectúa para todos los tubos j conectados al nudo n y $F_j(h_s, h_i)$ es una función no lineal de las cargas en los extremos h_s y h_i del tubo j definida con la ecuación 1.5.

1.7.3- Desarrollo del método del Instituto de Ingeniería, UNAM

Para resolver sistemas de ecuaciones no lineales se puede utilizar el método de Newton Raphson (Burden, Faires y Reynolds, 1979) o bien un procedimiento que simplifique el problema matemático a resolver, por ejemplo el método de Cross, que al considerar circuitos dentro de la red disminuye el número de ecuaciones no lineales por solucionar.

El método desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Sánchez y Fuentes, 1991) considera que la ecuación $f(Q)$, se desarrolla hasta la primera derivada mediante la serie de Taylor, entonces se obtiene la siguiente expresión:

$$f(Q + \Delta Q) = f(Q) + f'(Q)\Delta Q \quad (1.10)$$

Sea la función

$$f(Q) = C|Q|Q = h_s^{k+1} - h_i^{k+1}$$

CASO 1 Para $Q > 0$; $ Q Q = Q^2$

La ecuación 1.3 queda:

$$f(Q) = CQ^2$$

Su derivada es

$$f'(Q) = 2CQ \quad (1.11)$$

por lo que la ecuación 1.9 se puede escribir como:

$$f(Q + \Delta Q) = CQ^2 + 2CQ\Delta Q \quad (1.12)$$

Si se considera que $Q = Q^k$ y $\Delta Q = Q^{k+1} - Q^k$ donde k es un superíndice que representa el número de iteración, la ecuación 1.10 queda

$$f(Q + \Delta Q) = C(Q^k)^2 + 2CQ^k(Q^{k+1} - Q^k) \quad (1.13)$$

reduciendo términos

$$f(Q + \Delta Q) = -C(Q^k)^2 + 2CQ^k(Q^{k+1}) \quad (1.14)$$

Como $f(Q + \Delta Q) = f(Q^{k+1}) = h_s^{k+1} - h_i^{k+1}$

Por último, sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación 1.10

$$h_s^{k+1} - h_i^{k+1} = -C(Q^k)^2 + 2CQ^kQ^{k+1} \quad (1.15)$$

despejando Q^{k+1}

$$Q^{k+1} = \frac{h_s^{k+1} - h_i^{k+1}}{2CQ^k} + \frac{Q^k}{2} \quad (1.16)$$

CASO 2 Para $Q < 0$; $|Q|Q = -Q^2$

Con un procedimiento similar al antes expuesto se llega a la siguiente ecuación

$$h_s^{k+1} - h_i^{k+1} = -C(Q^k)^2 - 2C(Q^k)(Q^{k+1} - Q^k) \quad (1.17)$$

al despejar el gasto

$$Q^{k+1} = -\frac{h_s^{k+1} - h_i^{k+1}}{2CQ^k} + \frac{Q^k}{2} \quad (1.18)$$

Las ecuaciones 1.14 y 1.15 se pueden reunir en la expresión que se escribe a continuación:

$$Q^{k+1} = \frac{h_s^{k+1} - h_i^{k+1}}{2C|Q^k|} + \frac{Q^k}{2}$$

Si se considera

$$\alpha^k = \frac{1}{2C|Q^k|} \quad \dots(1.19)$$

A medida que k aumenta, Q^k y Q^{k+1} tienden a ser iguales.

1.7.3.1- Sistema de ecuaciones lineales

Si el gasto (en el entendido que corresponden al valor en la iteración k) de cada tubería j de la red se expresan en términos de las cargas piezométricas por medio

de la ecuación $q = -\frac{\sum H}{m \sum \frac{H}{Q}}$, se forma un sistema de ecuaciones lineales cuyas

incógnitas son las cargas de presión en la iteración $k + 1$. En efecto, se plantean las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} (-\alpha_1^k - \alpha_2^k - \alpha_6^k)h_1^{k+1} + \alpha_1^k h_2^{k+1} + \alpha_2^k h_3^{k+1} &= q_1 - \alpha_6^k h_5 + \frac{1}{2}(Q_1^k + Q_2^k - Q_6^k) \\ \alpha_1^k h_1^{k+1} + (-\alpha_1^k - \alpha_3^k - \alpha_4^k)h_2^{k+1} + \alpha_3^k h_3^{k+1} + \alpha_4^k h_4^{k+1} &= -q_2 + \frac{1}{2}(-Q_1^k + Q_3^k + Q_4^k) \\ \alpha_2^k h_1^{k+1} + \alpha_3^k h_2^{k+1} + (-\alpha_2^k - \alpha_3^k - \alpha_5^k)h_3^{k+1} + \alpha_5^k h_4^{k+1} &= q_3 + \frac{1}{2}(-Q_2^k - Q_3^k + Q_5^k) \\ \alpha_4^k h_2^{k+1} + (-\alpha_4^k - \alpha_5^k)h_4^{k+1} + \alpha_5^k h_3^{k+1} &= q_4 + \frac{1}{2}(-Q_4^k - Q_5^k) \end{aligned}$$

Sistema de ecuación 1.1

El sistema de ecuaciones escrito anteriormente tiene la gran ventaja de ser lineal. Tiene como incógnitas a h_1^{k+1} , h_2^{k+1} , h_3^{k+1} y h_4^{k+1} . Las ecuaciones anteriores se pueden simplificar al apreciar que, al no considerar al superíndice k , el término entre paréntesis del miembro derecho es precisamente $-q_n$. Esto es, $Q_1^k + Q_2^k - Q_6^k$ es igual a $-q_1$ de acuerdo con la primera ecuación del sistema 1.1 obtenido. Al tomar en cuenta esto, el sistema de ecuaciones anterior se puede escribir como:

$$\begin{aligned} (-\alpha_1^k - \alpha_2^k - \alpha_6^k)h_1^{k+1} + \alpha_1^k h_2^{k+1} + \alpha_2^k h_3^{k+1} &= \frac{q_1}{2} - \alpha_6^k h_5 \\ \alpha_1^k h_1^{k+1} + (-\alpha_1^k - \alpha_3^k - \alpha_4^k)h_2^{k+1} + \alpha_3^k h_3^{k+1} + \alpha_4^k h_4^{k+1} &= -\frac{q_2}{2} \\ \alpha_2^k h_1^{k+1} + \alpha_3^k h_2^{k+1} + (-\alpha_2^k - \alpha_3^k - \alpha_5^k)h_3^{k+1} + \alpha_5^k h_4^{k+1} &= \frac{q_3}{2} \\ \alpha_4^k h_2^{k+1} + (-\alpha_4^k - \alpha_5^k)h_4^{k+1} + \alpha_5^k h_3^{k+1} &= \frac{q_4}{2} \end{aligned}$$

Sistema 1.2

Con base en lo anterior, se afirma que para cualquier red de tuberías se requiere resolver un sistema de ecuaciones lineales cuyas incógnitas son h^{k+1} , del tipo

$$A \{h^{k+1}\} = B \quad \dots(1.20)$$

donde

- A Matriz de coeficientes del sistema de ecuaciones (depende de los parámetros k).
- $\{h^{k+1}\}$ Vector de incógnitas.

B Vector columna de términos independientes (depende de $q/2$, k y h).

1.7.4- Diseño de una red

El diseño de una red de distribución de agua potable tiene por objetivo determinar los diámetros de cada uno de sus tramos, de tal manera que satisfagan las restricciones de presión y demanda en los nodos, velocidad del fluido en las tuberías, y que además el conjunto de diámetros de las tuberías que sean seleccionados de cómo resultado la red más confiable y a menor costo.

1.7.5- Datos necesarios para realizar el diseño

Para el diseño de una red de distribución se deben considerar los siguientes criterios:

- La red de distribución se deberá diseñar para el caudal máximo horario.
- Identificar las zonas a servir y de expansión de la población.
- Realizar el levantamiento topográfico incluyendo detalles sobre la ubicación de construcciones domiciliarias, públicas, comerciales e industriales; así también anchos de vías, áreas de equipamiento y áreas de inestabilidad geológica y otros peligros potenciales.
- Considerar el tipo de terreno y las características de la capa de rodadura en calles y en vías de acceso.
- Para el análisis hidráulico del sistema de distribución se puede utilizar métodos como el de Hardy Cross, de seccionamiento o cualquier otro método racional.
- Para el cálculo hidráulico de las tuberías se utilizará fórmulas racionales.
- El diámetro a utilizarse será aquel que asegure el caudal y presión adecuada en cualquier punto de la red. Los diámetros nominales mínimos serán: 25mm en redes principales, 20mm en ramales y 15mm en conexiones domiciliarias.
- En todos los casos las tuberías de agua potable deben ir por encima del alcantarillado de aguas negras a una distancia de 1,00 m horizontalmente y 0,30 m verticalmente. No se permite por ningún motivo el contacto de las tuberías de agua potable con líneas de gas, poliductos, teléfonos, cables u otras.
- En cuanto a la presión del agua, debe ser suficiente para que el agua pueda llegar a todas las instalaciones de las viviendas más alejadas del sistema. La presión máxima será aquella que no origine consumos excesivos por parte de los usuarios y no produzca daños a los componentes del sistema, por lo que la presión dinámica en cualquier punto de la red no será menor a 5m y la presión estática no será mayor a 50m. (Manual de Agua Potable, CNA, 1999).
- La velocidad mínima en ningún caso será menor de 0,3 m/s y deberá garantizar la auto limpieza del sistema. En general se recomienda un rango de velocidad de 0,5 – 1,00 m/s. Por otro lado, la velocidad máxima en la red de distribución no excederá los 2 m/s.
- A fin de que no se produzcan pérdidas de carga excesivas, se revisan las velocidades del flujo en cada tubería.

V: Velocidad (m/s)

D: Diámetro de la tubería (m)

- El número de válvulas será el mínimo que permita una adecuada sectorización y garantice el buen funcionamiento de la red.

1.7.6. Rehabilitación de una red

La rehabilitación de redes de distribución de agua potable es el conjunto de técnicas y métodos que sirven para que la red recupere su función (dotar de agua al consumidor en cantidad, calidad y presión suficiente) que había disminuido o se había perdido por las siguientes causas:

- 1- Falta de capacidad de conducción. Se manifiesta como presiones insuficientes y puede deberse a la falta de mantenimiento y control de válvulas, tuberías y diámetros insuficiente, falta de capacidad en tanques de regulación.
- 2- Fugas.
- 3- Fracturas. Una fractura causada por agentes ajenos a la tubería, tales como contactos con otras estructuras, construcciones.
- 4- Calidad deficiente del agua.

Para llevar a cabo la rehabilitación de una red es necesario realizar las siguientes actividades:

- 1) Diagnóstico de funcionamiento actual.
- 2) Catastro de la red de distribución.
- 3) Aforos de las fuentes actuales y mediciones de presión y gasto en ciertos nodos de la red.
- 4) Censo del padrón para determinar la demanda actual.

Diagnóstico de la Red.

Para llevar a cabo este trabajo se tiene que realizar las siguientes actividades:

- Simulaciones de su funcionamiento hidráulico.
- Medición de presión y gasto en la Red.
- Identificación de zonas de baja y alta presión.
- Determinación de fugas, tuberías con pérdidas de carga excesiva, etcétera.

Catastro de la red.

Es necesario hacer un levantamiento de detalle de la infraestructura hidráulica existente. Se tendrá como producto final un plano con los detalles de la red, es decir, diámetro de las tuberías, longitud, tipo de material,, ubicación de válvulas y el tipo de las mismas; así como también capacidades de los tanques de regulación y datos de los equipos de bombeo en el caso de existir inyección directa a la red.

El catastro puede realizarse tomando como referencia planos anteriores existentes y corroborando en algunos sitios que los datos correspondan a los

que se indican en dichos planos. El catastro de la red será útil para realizar las simulaciones preliminares y en base a estas se propondrá los cambios necesarios para mejorar el funcionamiento hidráulico de la red.

Aforos de las fuentes actuales y mediciones de presión y gasto en ciertos sitios de la red.

Para hacer un buen diagnóstico del funcionamiento actual se necesita calibrar la red de distribución para lo cual es necesario hacer mediciones de presión y gasto en algunos sitios de la red; lo ideal es que se haga un monitoreo durante 24 horas continuas y será necesario hacerlo por 3 o 4 días, uno de esos días tiene que ser el domingo, pues como es un lugar donde ese día se incrementa mucho la población flotante, seguramente sería un “caso extremo” del funcionamiento de la red.

1.7.7- Operación de una red

La operación de la red se refiere a todas aquellas actividades que se deben realizar para que la red brinde un servicio eficiente con la calidad requerida, cantidad suficiente y presión adecuada durante la vida útil del sistema.

En la operación de la red no se incluye al mantenimiento tanto preventivo como correctivo que debe realizarse para mantener la red en buenas condiciones de operación.

Las actividades operativas deben incluir la recopilación de información y diagnóstico de operación.

La recopilación de información resulta de suma importancia en las labores del diagnóstico de funcionamiento del sistema. No todos los datos recopilados pueden ser determinantes al detectar la causa de un problema particular, pero proporcionan indicios de las posibles causas y, en conjunto con estudios específicos, ayudan en la implantación de acciones correctivas.

Las actividades anteriores pueden ser realizadas y planeadas más fácilmente si se cuenta con un modelo calibrado que pueda predecir el comportamiento de la red bajo condiciones normales o anormales de operación.

1.7.8 Revisión hidráulica

La revisión hidráulica consiste en determinar los gastos que circulan en las tuberías y los niveles piezométricos en varios puntos de la red. Para ello se requiere de la información siguiente:

Características físicas de las tuberías, conexiones entre tuberías, gasto de demanda, elevaciones de los tanques reguladores etcétera.

La revisión hidráulica de una red consiste en examinarla para comprobar que funciona correctamente, y observarla con cuidado para corregir las fallas.

Se realiza también un análisis de la infraestructura con la finalidad de obtener un diagnóstico del estado actual. En el se indican los aspectos destacables.

Para llevar a cabo dicha actividad, hay que contar con un catastro técnico de infraestructura que incluye infraestructura de conducción, distribución y regulación del sistema.

1.8 Cloración

Un aspecto fundamental del funcionamiento hidráulico de una red de distribución de agua potable, es la determinación de la concentración de cloro que se introduce en ella para que el agua no pierda sus características de calidad para el consumo humano.

La sustancia que se utiliza es el hipoclorito de sodio. Este apartado se dedica especialmente a la cloración. Se empieza con una reseña histórica, posteriormente se define lo que es la cloración, los diferentes estados en los cuales se presente el cloro, las reacciones químicas, se definen los por qué de su utilización y para terminar se comenta sobre el hipoclorito de sodio sustancia que se utilizó en los experimentos de laboratorio.

1.8.1- Reseña histórica

Desde hace más de 90 años la cloración desempeña un papel fundamental en lo que a la protección del agua se refiere; es cierto que actualmente cada vez que mencionamos la palabra cloro es muy probable que lo primero que se cruce por la mente sea la desinfección del agua de piscinas. Pero la cloración es un proceso de higienización que se llevó a cabo por primera vez en los sistemas de abastecimiento de agua potable, surge como alternativa eficiente para eliminar las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua; aunque pueda resultar extraño y a la vez sorprendente, la cloración ha sido responsable en gran parte del 50% del aumento de expectativa de vida en los países desarrollados durante el siglo XX. Una de las revistas más prestigiosas de los Estados Unidos sobre este tema establece los fenómenos de filtración y cloración como los avances más significativos en cuanto a salud pública; fue en 1846 que el doctor Ignaz Semmelweis introdujo uno de los primeros usos del cloro como desinfectante.

Así empezó todo y siguió su progreso en 1854, cuando John Snow intentó desinfectar el sistema de abastecimiento luego de un brote de cólera en Londres; la cloración continua se hizo presente en los primeros años del siglo XX en Gran Bretaña donde su aplicación redujo considerablemente las muertes por tifoidea; poco después dicho procedimiento se trasladó a los Estados Unidos en 1908 y se consiguieron eliminar las enfermedades transmitidas por el agua (cólera, tifoidea, disentería y hepatitis A).

1.8.2- Definición

Según el diccionario en línea la palabra cloración significa: Tratamiento en el que se emplea cloro para hacer potable el agua o aumentar su garantía de higiene. Otra definición en el mismo diccionario es la Reacción química en la cual se introduce un átomo de cloro en un compuesto.

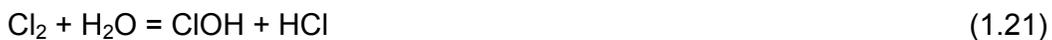
1.8.3- Cloro Residual

Es la cantidad de cloro que queda en el agua luego de haber ejercido su acción bactericida. El cloro residual se determina in situ mediante un aparato llamado *comparador de Cloro*. El cloro residual mínimo debe ser de 0.2 a 0.3 ppm (mg/l).

1.8.4- Cloro Consumido (CC)

Es la cantidad cloro utilizado en la eliminación de microorganismos en el agua.
Cloro consumido= Dosis aplicada - cloro Residual

1.8.5- Reacción Química



Cloro + Agua = Acido Hipoclorito + Acido Clohídrico

Pero a su vez:



Acido Hipocloroso = Ión hidrógeno + Ión hipoclorito

1.8.6- Ventajas de la Cloración

1. Gran acción bactericida. (eficiencia en la eliminación de microorganismos).
2. Rapidez de la reacción química.
3. Facilidad de almacenamiento.
4. Facilidad de envasamiento.
5. Facilidad de aplicación.
6. Creación de cloro residual.
7. Bajo costo
8. Transportación fácil.
9. En cantidades controladas, no produce efectos secundarios.

1.9- Hipoclorito de sodio

1.9.1- Definición

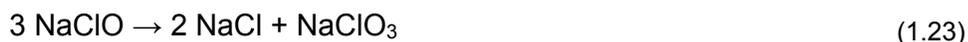
El hipoclorito de sodio o hipoclorito sódico, (conocido popularmente como lejía, cloro, agua lavandina o agua de Javel) es un compuesto químico, además de un fuerte oxidante químico cuya fórmula es NaClO.

1.9.2- Forma

El hipoclorito sódico existe en estado sólido en la forma de la sal pentahidratada $\text{NaOCl} \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ y con 2,5 moléculas de agua de hidratación por molécula: $\text{NaOCl} \cdot 2,5 \text{H}_2\text{O}$. La primera forma es la más conocida. A 0 °C se disuelven 29,3 g de la sal en 100 g de agua y a 23 °C ya son 94,2 g/100 g.

1.9.3- Reacciones

El hipoclorito de Sodio se disminuye a temperaturas elevadas para dar clorato de sodio y cloruro de sodio:



1.9.4- Usos

El hipoclorito sódico se usa mucho como oxidante en el proceso de potabilización del agua, a dosis ligeramente superiores al punto crítico (punto en que empieza a aparecer cloro residual libre).

Se emplea también como desinfectante en piscinas, ya sea por aplicación directa en forma de líquido, pastillas concentradas o en polvo, o a través de un aparato de electrólisis salina por el que se hace circular el agua de la piscina.

También se usa en el proceso de identificación de especies de los distintos filos de animales que poseen espículas o escleritos, como poríferos o equinodermos (holoturoideos). Este químico se puede también utilizar como blanqueador para las fibras textiles, así como para desinfectar los lavabos gracias a su poder fungicida y bactericida.

1.9.5- Fórmula de dilución del Hipoclorito de Sodio

$$\text{Gramos} = \frac{(\text{Volumen En Litros A Preparar}) \times (\text{ppm Requerida})}{(\text{Concentración Del Producto \%}) \times 10}$$

ppm: partes por millón.

El peso de cloro activo o útil se determina por análisis. Conocido este contenido de cloro en gr./l, de la solución de hipoclorito, se puede pasar a % en peso de cloro activo, dividiendo este resultado por el producto 10 x densidad de la solución, es decir:

$$\% \text{ de Cloro En Peso} = \frac{\text{gr / l. de Cloro}}{10 \times \text{densidad Sol}}$$

El contenido o peso de hipoclorito sódico en gr./l, de una solución de éste, se calcula convirtiendo los gr./l, de cloro activo en su equivalente como hipoclorito sódico, para ello basta con multiplicar por la relación de sus respectivos peso moleculares ($74 / 71 = 1,05$):

$$\text{Grs/l. de hipoclorito sódico} = \text{grs./l, de cloro útil} \times 1,05.$$

1.9.6- Síntesis

El hipoclorito de sodio es un producto también usado en hogares y comúnmente es denominado cloro.

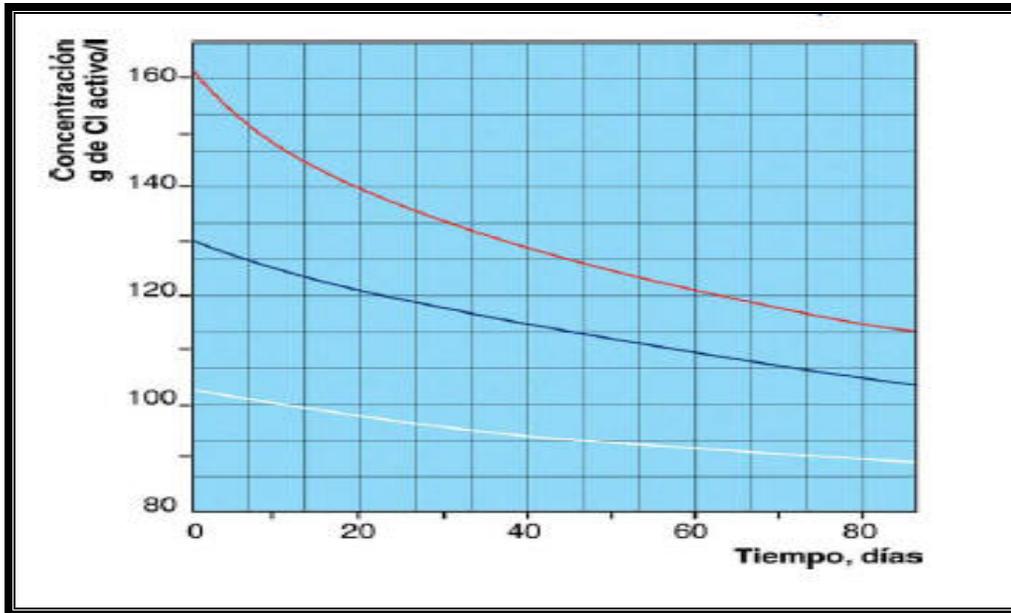
El uso industrial de la "lejía" va unido al uso del cloro como blanqueador. DERRY (1977) afirma que el uso del cloro como blanqueante fue utilizado primero por Claude Louis Berthollet (1785), cuya agua de Javel se obtenía haciendo pasar cloro a través de potasa (sin embargo, Carl Wilhelm Scheele, descubridor del cloro (1785), ya había notado estas propiedades). Posteriormente, Charles Tennant (1799) utilizaría el cloro que se obtenía como subproducto en la fabricación de sosa; el producto de Tennant era un hipoclorito de calcio en polvo.

Desde finales del siglo XVIII, además, se fueron encontrando usos al hipoclorito como desinfectante; los pioneros fueron el médico francés Pierre-François Percy (1793; la reducción de mortalidad sería de alrededor del 50%) y el farmacéutico Antoine Germain Labarraque (1825), a quien se atribuye la sustitución del potasio por sodio.

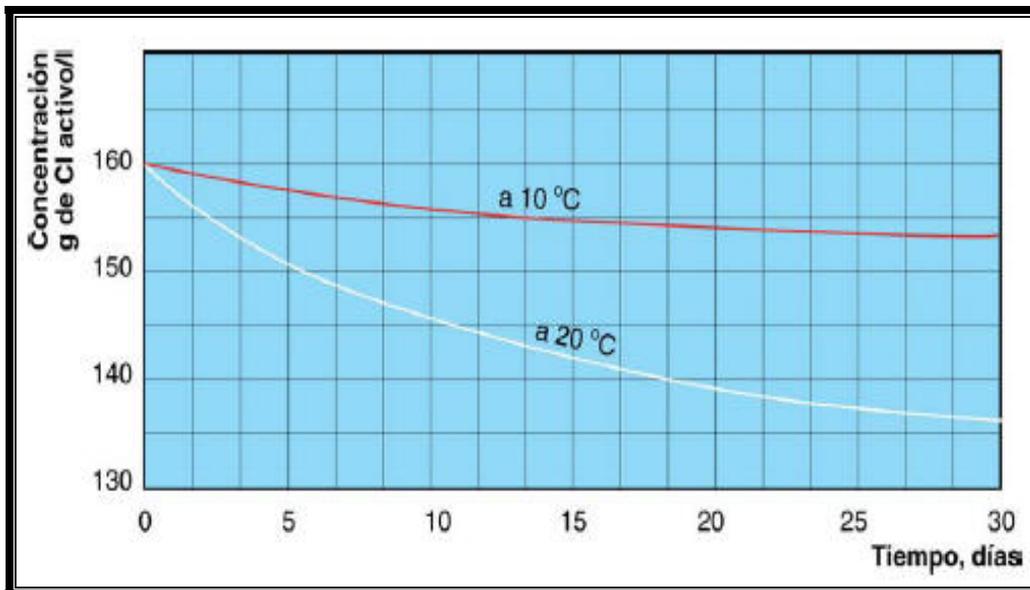
En México, el Dr. Francisco Montes de Oca, hacia 1860 inició la escuela entre los cirujanos militares de: lavar los campos quirúrgicos y camas de los heridos de guerra, lavar las manos antes, durante la cirugía y al concluir las amputaciones, lavar las heridas con el licor de Labarraque (Con un sistema que usaría Alexis Carrel en la primera Guerra Mundial), por lo que fue el iniciador empírico de la antisepsia, esto demostrado por las múltiples tesis de la Facultad de Medicina de la UNAM y los trabajos de Quijano, Soriano, quienes reafirman esta primacía y extenso uso del referido licor desde 1860 hasta 1900.

1.9.7 Inestabilidad del NaOCl en función del tiempo y temperatura

El hipoclorito sódico es inestable, por lo que se prepara en solución acuosa de concentración limitada, la solución va perdiendo cloro a un ritmo mensual del 2 al 4 %, perdiendo aún más si la temperatura es mayor de 30 °C. En las gráficas 1.1 y 1.2 se muestra la degradación en función del tiempo y la temperatura.



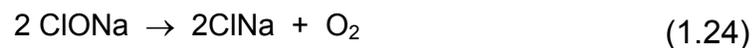
Gráfica 1.1 Degradación del NaOCl en función del tiempo y temperatura



Gráfica 1.2 Degradación del NaOCl en función del tiempo y temperatura

El calor, la luz, el contacto con ácidos y ciertos metales, lo descomponen en cloro gas, ácido hipocloroso y ácido clorhídrico.

La descomposición suele ser según la reacción:



En su descomposición puede llegar a formarse clorato:



1.9.8 Tabla resumen

En la tabla 1.2 se presenta un resumen de todo lo que se había visto acerca del hipoclorito de sodio, empezando desde su fórmula hasta sus propiedades químicas.

CONCENTRACION COMERCIAL (13-15%)	13			
GRAVEDAD ESPECIFICA	1.24			
VOLUMEN DE AGUA	450	L		
DENSIDAD RELATIVA (20°C Y 12%)	1.07	1.14		

$$Cl_2 \text{ activo (g/l)} = \text{Densidad relativa} * \text{Concentración comercial} * 10$$

COLOR ACTIVO POR LITRO				
VOLUMEN DE REACTOR	450	L		
VOLUMEN DE CLORO COMERCIAL AGREGADO (L)	COLOR ACTIVO	COLOR ACTIVO	CONCENTRACIÓN DE CLORO EN REACTOR (g/L)	CONCENTRACIÓN DE CLORO EN REACTOR (mg/L)
0.00065	139.1	0.090415	0.0002	0.20
0.0007	139.1	0.09737	0.0002	0.22
0.0008	139.1	0.11128	0.0002	0.25
0.0015	139.1	0.20865	0.0005	0.46
0.002	139.1	0.2782	0.0006	0.62
0.0025	139.1	0.34775	0.0008	0.77
0.003	139.1	0.4173	0.0009	0.93
0.004	139.1	0.5564	0.0012	1.24
0.00405	139.1	0.563355	0.0013	1.25

Tabla 1.2 Cálculo del volumen de hipoclorito de sodio

Capítulo 2

Difusión

El descubrimiento de la difusión fue realizado por Graham mediante experimentos efectuados entre los años de 1828 y 1833. Graham descubrió la difusión de los líquidos y estuvo muy cerca de emitir la ley que ahora se conoce como Ley de Fick, pero Graham no acertó, porque la Ley de Fick implica una relación lineal entre el flujo de difusión y la diferencia de concentraciones que produce dicho flujo; él buscaba una relación más complicada o espectacular como la que encontró en otro de sus experimentos con gases, en los que Graham había demostrado que el flujo de difusión de un gas a través de un tapón poroso es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de las densidades de los gases empleados. Tan impresionante fue este resultado para su época, que le valió su elección para ingresar a la Royal Society a la edad de treinta años.

Años más tarde, Adolf Eugen Fick (1829-1901), fisiólogo alemán de reconocido prestigio científico. Fick participaba del espíritu científicista de la época y pretendía combinar las matemáticas con la medicina, para señalar que las ciencias básicas deben ser usadas para fundamentar la medicina. Estos conceptos de Fick fueron influenciados por Carl Ludwig (1816-1895)

Los estudios de la difusión los realizó Fick en Zurich en 1855 cuando tenía 26 años de edad. Este investigador planteó los experimentos de Graham sobre bases cuantitativas y descubrió la ley de la difusión un tanto casualmente. Esto ocurrió cuando Fick sugirió en su publicación una comparación de la difusión de un material disuelto con la Ley de Ohm para conductores eléctricos y también con la ley de la transferencia de calor en conductores sometidos a una diferencia de temperaturas. Esta confrontación dio la clave para la formalización matemática de la difusión.

2.1- Definición

La difusión es el proceso por el cual las moléculas, iones u otras pequeñas partículas espontáneamente se mezclan, moviéndose de regiones de relativamente alta concentración hacia regiones de baja concentración.

Difusión también se define como el lento movimiento de moléculas individuales de una región a otra. No importa lo sólido que se vea una ventana de cristal, las moléculas de aire pueden difundirse cómodamente, o pasar a través del vidrio. La figura 2.1 nos muestra la difusión del aire a través de una ventana.



Figura 2.1 diagrama de difusión de aire a través de una ventana.

2.1.1- Ecuación de la difusión

La ecuación de la difusión es una ecuación en derivadas parciales que describe fluctuaciones de densidad en un material que se difunde. Es también usada para describir procesos exhibiendo un comportamiento de difusión

La ecuación es generalmente escrita como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D(\phi, \vec{r}) \nabla \phi(\vec{r}, t)) \quad (2.1)$$

donde,

ϕ es la densidad del material que difunde

t es tiempo,

D es el coeficiente de difusión colectivo

\vec{r} es la coordenada espacial y el símbolo nabla (∇) representa el vector operador diferencial nabla. Si el coeficiente de difusión depende de la densidad, entonces la ecuación no es lineal; de otra manera sería lineal. Si D es constante, entonces la ecuación se reduce a la siguiente ecuación lineal:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \nabla^2 \phi(\vec{r}, t), \quad (2.2)$$

Más generalmente, cuando D es una matriz simétrica definida y positiva, la ecuación describe una difusión anisótropa.

2.1.2- Coeficiente de difusión

En la Física, el coeficiente de difusión es un valor que representa la facilidad con que cada soluto en particular, se mueve en un solvente determinado, y depende de tres factores:

- Tamaño y forma del soluto
- Viscosidad del solvente
- Temperatura

2.2 Ley de Fick

Adolf Eugen Fick (nacido el 3 de septiembre de 1829 en Kassel, Alemania; fallecido el 21 de agosto de 1901 en Blankenberge, Bélgica) fue un médico alemán, al que se le ha atribuido usualmente la invención de los lentes de contacto. En 1855 derivó unas leyes de difusión, que se refieren a la difusión y ósmosis de un gas a través de una membrana. En 1870 fue el primero en describir una técnica para medir el volumen de sangre bombeada por el corazón, a razón de ventrículo por minuto. En 1887 elaboró su primer modelo exitoso de lentes de contacto: una concha afocal de contacto esclerótico hecha de vidrio, la que ensayó primero en conejos, luego en sí mismo y posteriormente en un grupo de voluntarios. Su ley de difusión es aplicada todavía en nuestros días, sobre todo en Fisiología y Física.

La **ley de Fick** es una ley cuantitativa en forma de ecuación diferencial que describe diversos casos de difusión de materia o energía en un medio en el que inicialmente no existe equilibrio químico o térmico. Recibe su nombre Adolf Fick, que las derivó en 1855. En situaciones en las que existen gradientes de concentración de una sustancia, o de temperatura, se produce un flujo de partículas o de calor que tiende a homogeneizar la disolución y uniformizar la concentración o la temperatura. El flujo homogeneizador es una consecuencia estadística del movimiento azaroso de las partículas que da lugar al segundo principio de la termodinámica, conocido también como movimiento térmico casual de las partículas. Así los procesos físicos de difusión pueden ser vistos como procesos físicos o termodinámicos irreversibles.

La experiencia demuestra que cuando se abre un frasco de perfume o de cualquier otro líquido volátil, podemos olerlo rápidamente en un recinto cerrado. Se dice que las moléculas del líquido después de evaporarse se difunden por el aire, distribuyéndose en todo el espacio circundante. Lo mismo ocurre si se coloca un terrón de azúcar en un vaso de agua, las moléculas de sacarosa se difunden por todo el agua. Estos y otros ejemplos muestran que para que tenga lugar el fenómeno de la difusión, la distribución espacial de moléculas no debe ser homogénea, debe existir una diferencia, o gradiente de concentración entre dos puntos del medio, ver la figura 2.2.

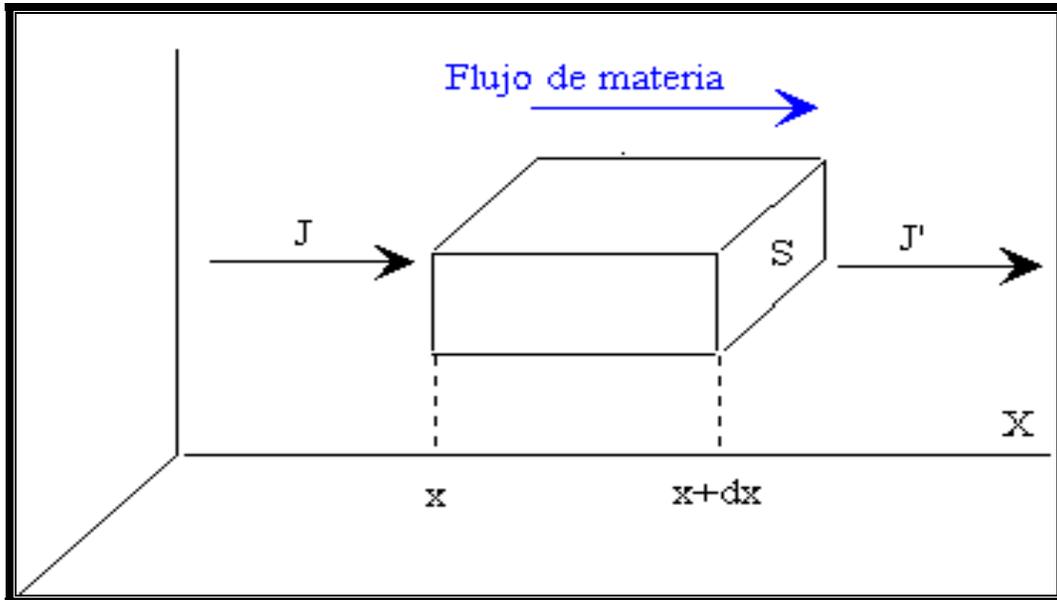


Figura 2.2 Flujo de materia

Si se supone que su concentración varía con la posición a lo largo del eje X. Sea J la densidad de corriente de partículas, es decir, al número efectivo de partículas que atraviesan en la unidad de tiempo un área unitaria perpendicular a la dirección en la que tiene lugar la difusión. La ley de Fick afirma que la densidad de corriente de partículas es proporcional al gradiente de concentración:

$$J = -D \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.3)$$

La constante de proporcionalidad se denomina coeficiente de difusión D y es característico tanto del soluto como del medio en el que se disuelve.

La acumulación de partículas en la unidad de tiempo que se produce en el elemento de volumen $S \cdot dx$ es igual a la diferencia entre el flujo entrante JS , menos el flujo saliente $J'S$, es decir:

$$JS - J'S = \frac{\partial J}{\partial x} S dx \quad (2.4)$$

La acumulación de partículas en la unidad de tiempo es:

$$(S dx) \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2.5)$$

Igualando ambas expresiones y utilizando la Ley de Fick se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial n}{\partial x} \right) = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2.6)$$

Ecuación diferencial en derivadas parciales que describe el fenómeno de la difusión. Si el coeficiente de difusión D no depende de la concentración:

$$\frac{1}{D} \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

2.3 Tipos de difusión

2.3.1.- Difusión por 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 y como resultado de diferentes procesos químicos o bioquímicos puede variar su concentración. Según la forma de reacción, las sustancias en el agua se pueden dividir en tres grupos:

- a) 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.
- b) 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.
- c) 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.

Se supone como válida una ecuación cinética de primer orden para la reacción del cloro con el agua, del siguiente tipo:

$$\frac{dC}{dt} = K_a \cdot C \quad (2.8)$$

donde

C es la concentración (g/m^3) y
 K_a es la constante cinética (s^{-1})

2.3.2 Difusión convectiva

Conocida también como difusión por advección, considera los cambios de concentración generados por la velocidad del flujo. Por ejemplo el sulfato de cobre puede ser completamente mezclado en unos minutos si la solución es agitada. La agitación no es un proceso molecular pero es un proceso microscópico que cambia porciones de fluidos sobre distancias largas, ver la figura 2.3.

Advección:

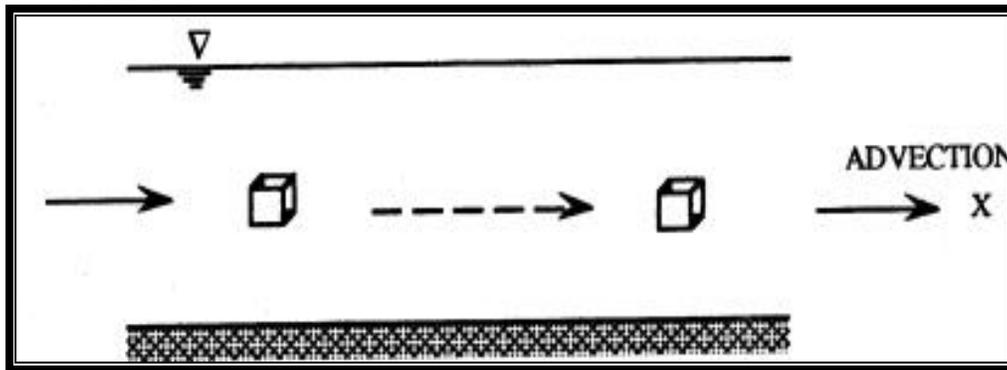


Figura 2.3 Movimiento de masa contenida en una corriente y que viaja de un lado a otro.

2.3.3- Difusión molecular

La difusión molecular es la mezcla de químicos disueltos debido al movimiento al azar o aleatorio de las moléculas dentro del fluido. Causado por movimiento molecular vibracional, rotacional y trasversal. En el movimiento de sustancias disueltas se mueven de regiones de altas concentraciones, a regiones de bajas concentraciones, de acuerdo a la ley de Fick de difusión.

2.3.4- Difusión Turbulenta

La difusión turbulenta es la mezcla de sustancias particuladas finas debido a la turbulencia en micro escala causada por fuerza de rozamiento dentro del cuerpo de agua, ver la figura 2.4.

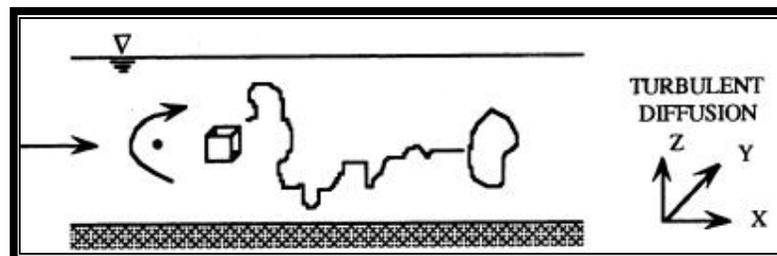


Figura 2.4 difusión turbulenta

2.4- Concentración

El cálculo de la difusión en fluidos heterogéneos (constituido por más de una sustancia o especie) se hace con base en la ecuación de conservación de masa, que debe verificarse para cada componente o especie. Por simplicidad, las discusiones siguientes se referirán siempre a un sistema binario, esto es, de dos componentes.

Para la mezcla entre dos componentes diferentes, uno será designado como la especie *A* y el otro como la *B*. En algunos casos, tales como la mezcla de agua

de mar y agua dulce pueden tratarse también, dentro de una aproximación razonable, como sistemas binarios, aunque el agua sea un líquido multicompuesto.

Se entiende por concentración a la cantidad relativa de una sustancia en un cierto punto y en un tiempo dado. Se puede expresar en unidades de masa, peso, volumen, número de partículas por unidad de volumen.

En el presente estudio se prefiere expresarla como la masa de una sustancia (m_A o m_B) contenida en 1 m^3 , entre la masa de la mezcla contenida en un 1 m^3 . Así

$$C_A = \frac{m_A}{m_A + m_B}$$

o bien (2.9)

$$C_B = \frac{m_B}{m_A + m_B}$$

Por otra parte se tiene que

$$m_A + m_B = m \tag{2.10}$$

a veces la masa A es agua y m_A es tan pequeña con relación a m_B que

$$m_A + m_B \cong m_B \cong m \tag{2.11}$$

por lo que la concentración de la sustancia A resulta ser

$$C_A = \frac{m_A}{m} \tag{2.12}$$

Ahora si se despeja la masa de la sustancia A , se obtiene

$$m_A = C_A m \tag{2.13}$$

al dividir cada término de la ecuación anterior entre el volumen de la mezcla, resulta que

$$\frac{m_A}{V} = \frac{m}{V} C_A \tag{2.14}$$

como la densidad (ρ) se define como la masa de la sustancia contenida en la unidad de volumen, es decir

$$\rho = \frac{\text{masa de } A + \text{masa de } B}{\text{volumen de la mezcla de } A \text{ y } B} = \frac{m}{V} \tag{2.15}$$

De este modo la ecuación 5.6 queda

$$\rho_A = C_A \rho \tag{2.16}$$

De aquí en adelante se mencionará a C como la concentración de la sustancia A , (C_A), es decir,

$$C = C_A$$

2.4.1 Balance de masa en la confluencia de varias tuberías (según la teoría)

Las tuberías que se juntan en un nudo se clasifican en dos grupos; el primero está formado por las tuberías con un gasto que llega al nudo y, el segundo con las tuberías que tienen un gasto de salida desde dicho nudo, como se ilustra en la figura 2.5.

Se considera que las aportaciones de masa de cada una de las tuberías del primer grupo a un nudo en particular es igual a:

$$m_i = \sum_{i=1}^N C_i^k Q_i \Delta t \quad (2.17)$$

en la ecuación anterior Q_i representa a los gastos de entrada al nudo i desde una tubería del primer grupo, N el número de tuberías del primer grupo.

Por las tuberías del segundo grupo egresará desde el nudo un fluido que contiene una mezcla uniforme con concentración C_E , por lo que la masa que sale es:

$$m_s = C_E \left(\sum_{i=1}^M G_i + q_E \right) \quad (2.18)$$

donde q_E es el gasto que se suministra a los usuarios de la red, G_i los gastos de salida por una tubería del segundo grupo y M el número de tuberías del segundo grupo.

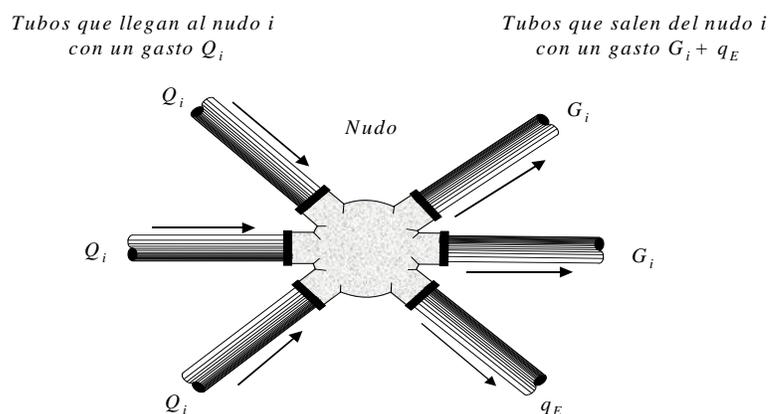


Figura 2.5 Esquema de tuberías que se juntan en un nudo.

Por el principio de conservación de masa, la que entra es igual a la que sale

$$m_I = m_s \quad (2.19)$$

Así; al igualar las ecuaciones 2.17 y 2.18, se puede despejar a la concentración de la mezcla, de modo que:

$$C_E^{k+1} = \frac{\sum_i^N C_i^k Q_i}{\sum_i^M G_i + q_E} \quad (2.20)$$

Capítulo 3

Comportamiento de la difusión de sustancia.

Para contribuir al mejoramiento de la calidad del agua potable que suministran las redes de agua potable hasta los puntos de consumo, es necesario garantizar cierta concentración de cloro residual en toda la red de distribución o localizar los puntos donde se presenta un déficit en su concentración. Para ello, es necesario determinar las dosis óptimas de cloro y los sitios donde se deben inyectar en la red para garantizar que la cantidad de cloro esté dentro de un rango de valores aceptables. En varios países existen parámetros que debe cumplir el agua, en el caso de México es la norma NOM-127-SSA1-1994 (publicada en el Diario oficial, el jueves 18 de enero de 1996).

En este capítulo se describe la metodología aplicada para el estudio del comportamiento del hipoclorito de sodio bajo diferentes escenarios en un cruce de tuberías y una red de distribución de agua potable para determinar su concentración después del mezclado y establecer así la dosis y puntos en donde es necesario una inyección de hipoclorito de sodio para que el agua suministrada a los usuarios cumpla con la normatividad.

Dichas pruebas se realizaron en un modelo físico cuyas características se describen en el punto 3.2.

Y a continuación se presenta el esquema de la metodología aplicada en este estudio, ver figuras 3.1 y 3.2.

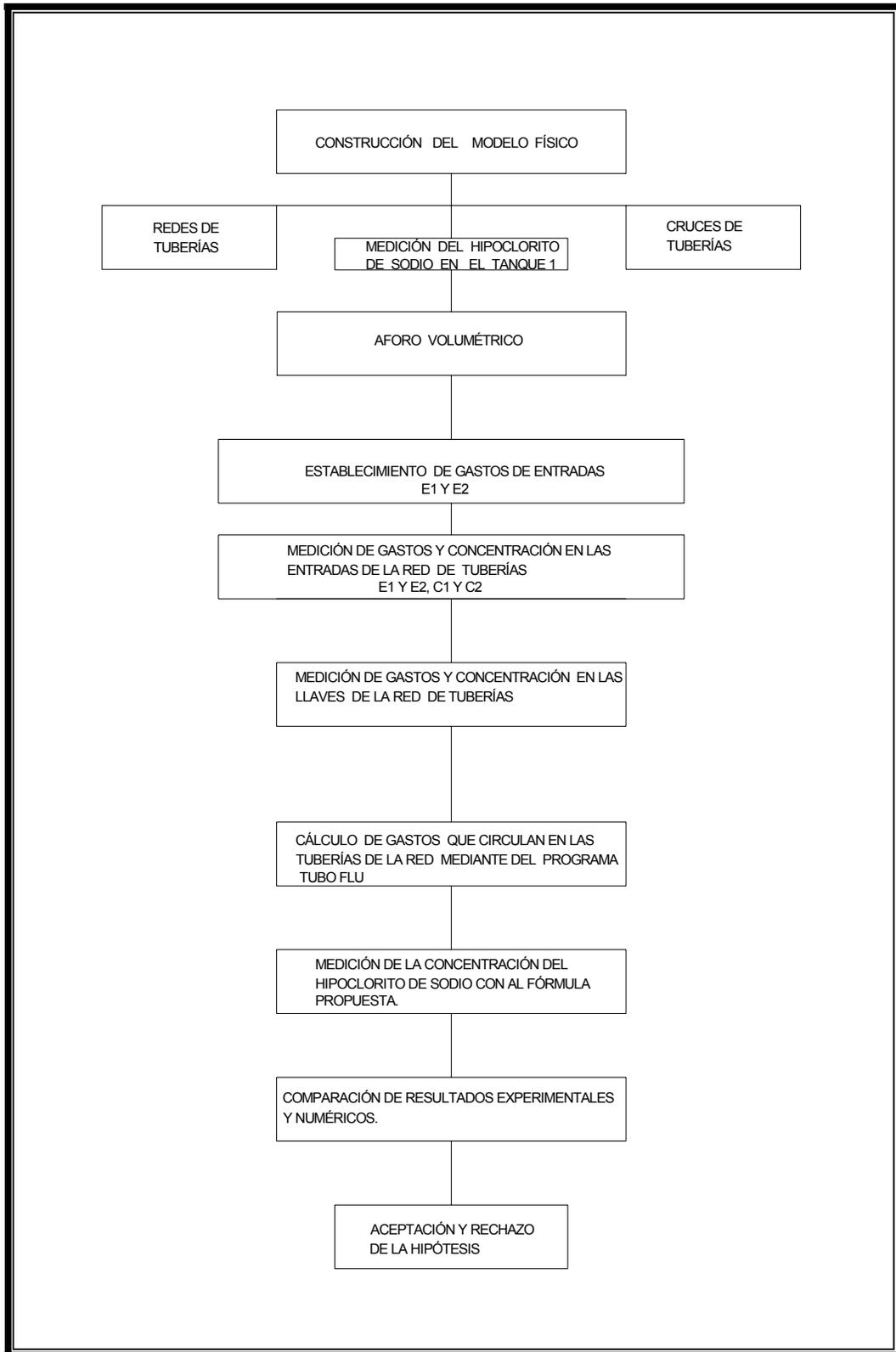


Figura 3.1 Diagrama de flujo para el desarrollo experimental (Red de tuberías)

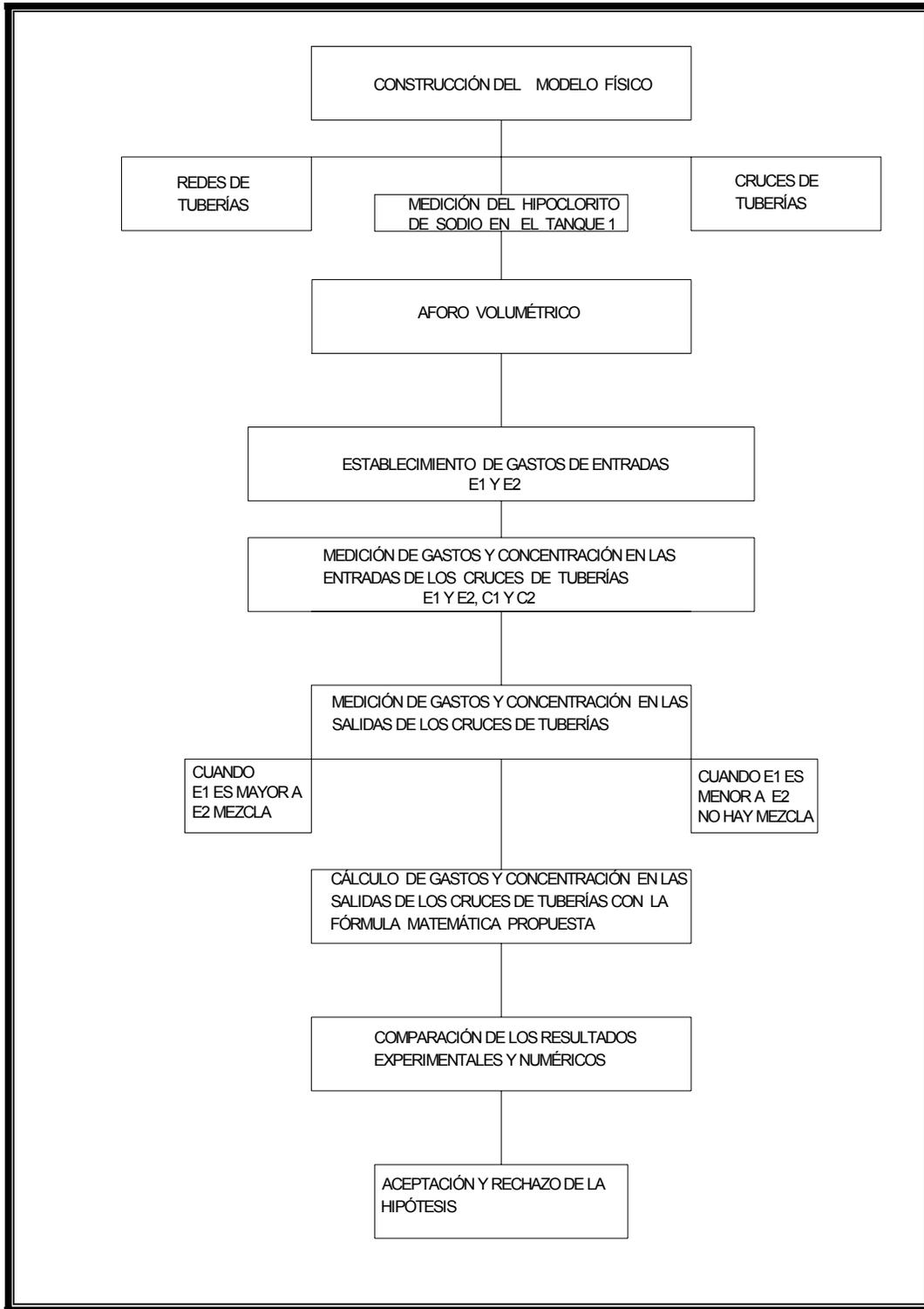


Figura 3.2 Diagrama de flujo para el desarrollo experimental (Cruces de tuberías)

3.1- Objetivos del experimento.

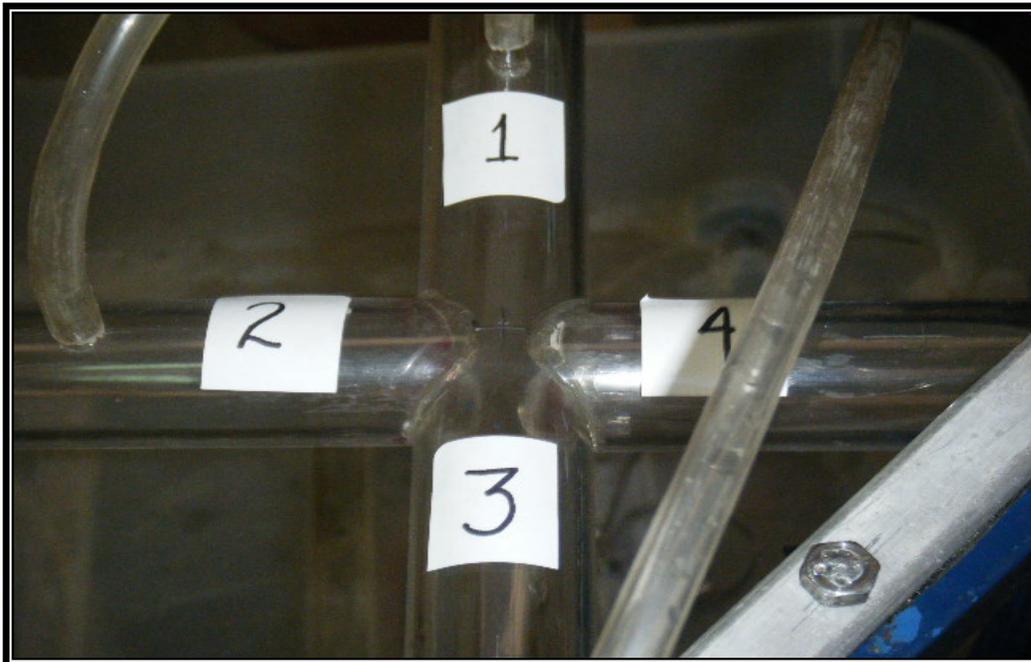
- 1- Calcular la concentración del hipoclorito de sodio en las salidas de un cruce de tuberías.
- 2- Estimar la concentración del hipoclorito de sodio en los nudos de una red de tuberías para localizar tuberías donde se presenta déficit en su concentración, determinar la dosis óptima de cloro, y adicionar cierta cantidad de cloro para garantizar su concentración dentro de las normas establecidas.

3.2- Dispositivo físico en el laboratorio

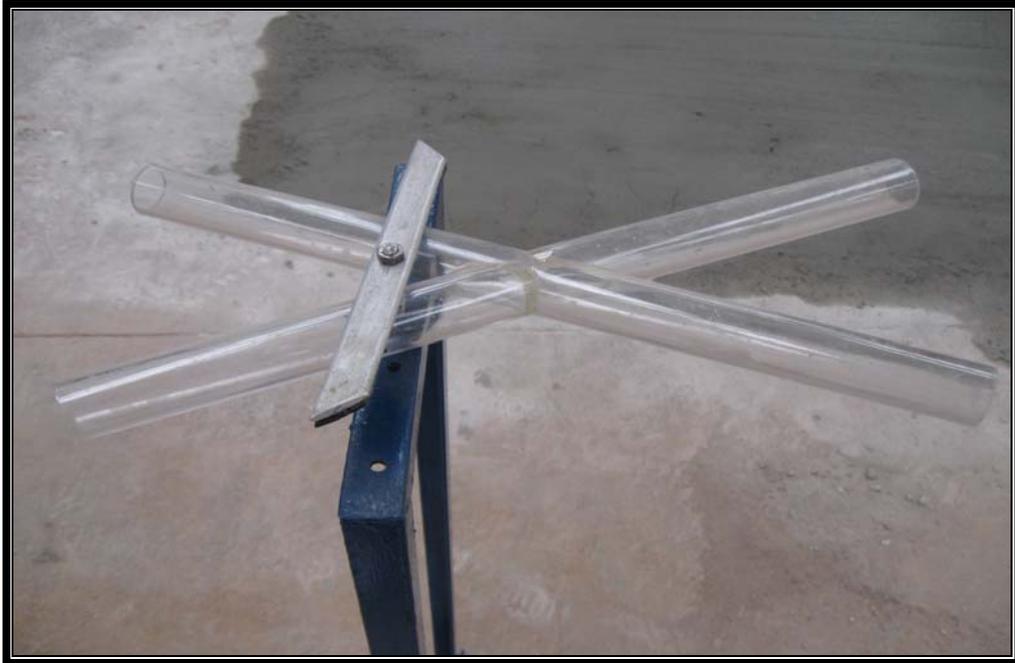
Para alcanzar los objetivos de este trabajo de investigación, fue necesario construir dos modelos físicos en el laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería UNAM con el propósito de analizar, visualizar y entender los fenómenos que ocurren durante las pruebas.

3.2.1.- Modelo de los cruces de tuberías

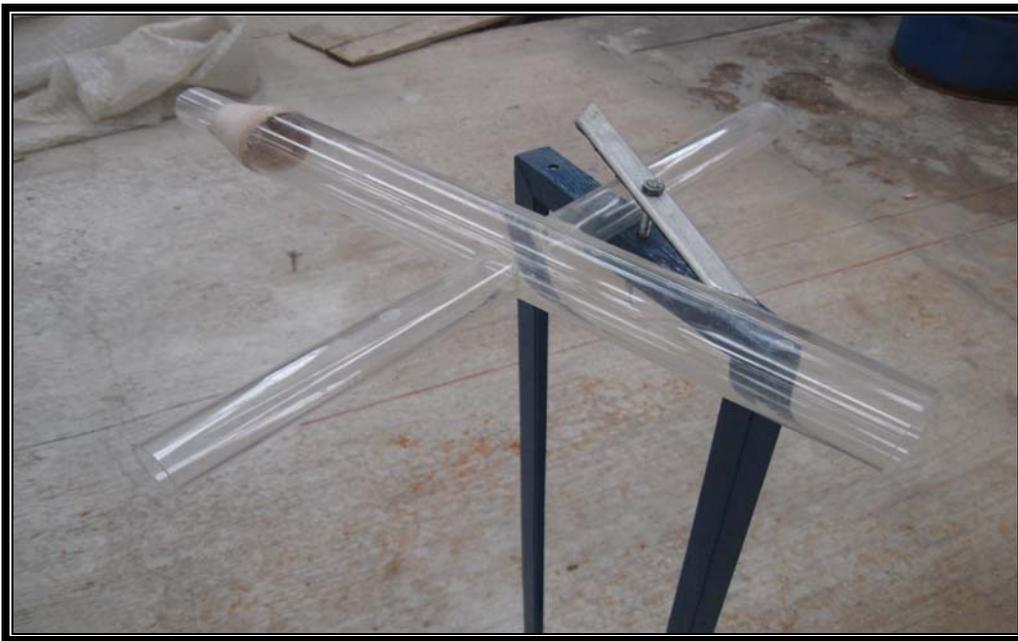
Este modelo se diseñó con tres cruces diferentes. El primero de ellos cuenta con tuberías de acrílico de 25.4 mm de diámetro, con ángulo de 90 grados. El segundo con las mismas características anteriores a diferencia del ángulo que es de 45 grados y el tercer cruce se diseñó con tubos de acrílico de 35 y 25 mm de diámetros, con un ángulo de 90 grados. La altura del nivel de piso al eje de los cruces es de 1.00 m de altura. En las entradas y salidas de los cruces se colocó un piezómetro con el propósito de medir los niveles piezométricos, ver Fotografías 3.1, 3.2 y 3.3.



Fotografía 3.1 Cruces de tuberías de 90 grados



Fotografía 3.2 Cruces de tuberías de 45 grados



Fotografía 3.3 Cruces de tuberías de 35 y 25.4 mm de diámetro

Este modelo se abasteció con agua limpia y agua con una sustancia disuelta por dos tanques: uno de 450 litros elevado a 0.95 metro de altura y el otro de 1100 litros de capacidad, a 1.23 metros. Para regular el gasto, se instaló en la salida de cada tanque una válvula de 1.5 pulgadas y el tanque 1 se alimentó por gravedad, conectándolo con el tanque 2 con una manguera de 25 mm de diámetro. En la salida de cada tanque, se instaló un piezómetro con el fin de visualizar el nivel del agua en los tanques.

3.2.2- Modelo de red de tuberías

La red se diseñó considerando al espacio disponible en el laboratorio; y ésta está formada por tuberías de acrílico de 19 mm, 25.4 mm y 31.4 mm diámetro, con 8 válvulas de ½ pulgada de diámetro que permiten extraer el gasto que simula la demanda en la red, ver la Fotografía 3.4.



Fotografía 3.4 Red de agua potable en el laboratorio

La red tiene 3 circuitos que ocupan un área total de 10.7 metros cuadrados, Cuenta con 5 tuberías de 1.90 m de largo y 5 de 1.88 m de longitud. En cada unión de tramo se colocó una válvula de nariz de ½ pulgada de diámetro, por lo que se tienen 8 salidas de agua, ver Fotografía 3.4 y figura 3.3.

La altura del nivel de piso al eje de las tuberías de la red es de 1.00 m de altura. Otras características de la red se encuentran en la Tabla 3.1.

No de tubería	NUDO		Longitud (m)	Diámetro (mm)
	Inicial	Final		
1	8	7	1.86	19
2	4	8	1.87	19
3	6	7	1.87	19
4	4	6	1.86	19
5	1	2	1.87	25.4
6	3	4	1.87	19
7	5	6	1.87	19
8	3	5	1.86	19
9	1	10	0.91	25.4
10	10	3	0.91	25.4
11	2	9	0.91	19
12	9	4	0.91	19

Tabla 3.1 Características de la red

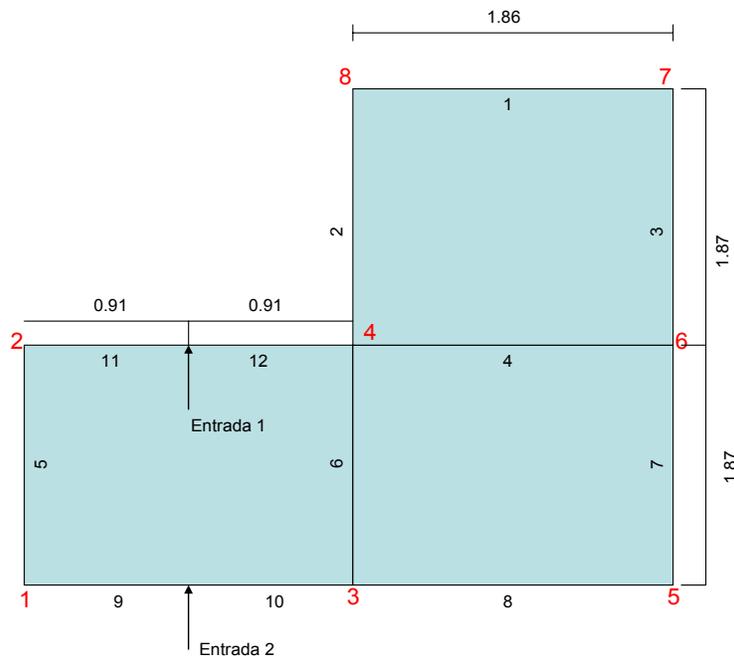


Figura 3.3 Plano de la red del modelo físico

La red es alimentada por dos tanques. El tanque No.1 destinado para la sustancia (Cloro ó trazadora), es un tinaco de 450 litros de capacidad, colocado a una altura de un metro del piso y el tanque (No.2) que se encuentra colocado un nivel 1.2 metros del piso.

3.3.- Realización de ensayos en el dispositivo físico

En los dispositivos físicos se realizaron varias pruebas con el propósito de conocer la concentración del hipoclorito de sodio (NaOCl), primero en la salida de los cruces de tuberías y posteriormente en los nodos de la red. Cabe mencionar que esta sustancia fue elegida por su facilidad para medir su concentración y por su bajo costo.

3.3.1.- Procedimiento de cálculo de la concentración

El control de la calidad del agua, para uso y consumo humano es esencial para garantizar la salud pública, por lo que es necesario contar con un instrumento que regule y establezca las características que debe contener el agua, así como, su cuidado; a través de un programa de control y seguimiento por parte de los responsables de operar, mantener y administrar el sistema de abastecimiento y de su vigilancia por parte de la autoridad sanitaria.

Derivado de lo anterior la Secretaría de Salud establece la necesidad de conjuntar las Normas Oficiales Mexicanas a la NOM-127-SSA1-1994 y la NOM-179-SSA1-1998, para reforzar la protección y garantizar la calidad del agua, desde la captación en la fuente hasta la entrega al consumidor, con el fin de prevenir y disminuir enfermedades infecciosas, parasitarias y las derivadas de

la continua exposición a sustancias tóxicas que puede contener el agua abastecida a la población, sea por contaminación natural o antropogénica. En cuanto al cloro residual libre, el agua debe contar con una concentración entre 0.2 y 1.50 mg/l para cumplir con las normas de salud y sobre todo mantenerla libre de contaminantes, ya sean químicos o agentes que causen efectos nocivos al ser humano.

3.3.2.- Medición de gastos y niveles piezométricos en cruces de tuberías

Los gastos de salida en los tanques y a las salidas de los cruces se obtuvieron con aforos volumétricos; se empleó una probeta para medir el volumen de cada muestra, y se consideró el tiempo del muestreo.

Los niveles piezométricos se midieron a partir de unos piezómetros que se instalaron en las entradas y salidas de cada cruce. Fotografía 3.1.

Para la medición de la concentración, se empleó una metodología que se describirá más adelante.

A continuación, se presenta una tabla (3.2) que resultó de los aforos volumétricos que se hicieron para calcular los diferentes gastos en las salidas de los tanques, para determinar en cual escenario habrá una cierta mezcla de sustancia en las salidas de los cruces.

TABLA DE GASTO EN L/S		
	Salida tanque 1	Salida tanque 2
Gasto 1	0.21	0.72
Gasto 2	0.72	0.72
Gasto 3	1.4	0.72
Gasto 4	0.21	1.35
gasto 5	0.72	1.35
Gasto 6	1.4	1.35
Gasto 7	0.21	1.53
Gasto 8	0.72	1.53
Gasto 9	1.4	1.53

Tabla 3.2 Resultados de los aforos volumétricos en los tanques

3.3.3.- Medición de la concentración.

Para conocer las concentraciones en el dispositivo físico (salidas de cruces de tuberías), se realizaron las siguientes secuencias:

- A- partir de una pipeta graduada, (Fotografía 3.5) se mide un volumen de Hipoclorito de Sodio.



Fotografía 3.5 Pipeta graduada para medir volumen de cloro

B- Posteriormente, este volumen se le agrega en un volumen de agua conocido. Este volumen corresponde a los 450 litros del tanque 1.

C- Se utiliza un agitador eléctrico para mezclar y espera un lapso de 3 minutos para tener una mezcla uniforme.

D- Se establece un gasto de salida con una válvula de compuerta ubicada en la salida de los dos tanques. Los que podemos observar en la Tabla 3.2

E- Se espera a establecer el flujo en los cruces. Este tiempo es aproximadamente de 1 a 2 minutos, ver fotografía 3.6.



Fotografía 3.6 Gasto en las salidas de los cruces

F- Una vez establecido el flujo, se realizaron aforos volumétricos para la medición de los gastos y se tomaron las muestras por cada salida de cruces, en dos vasos precipitados, ver Fotografía 3.7.



Fotografía 3.7 Vaso precipitado sirve para medir muestra

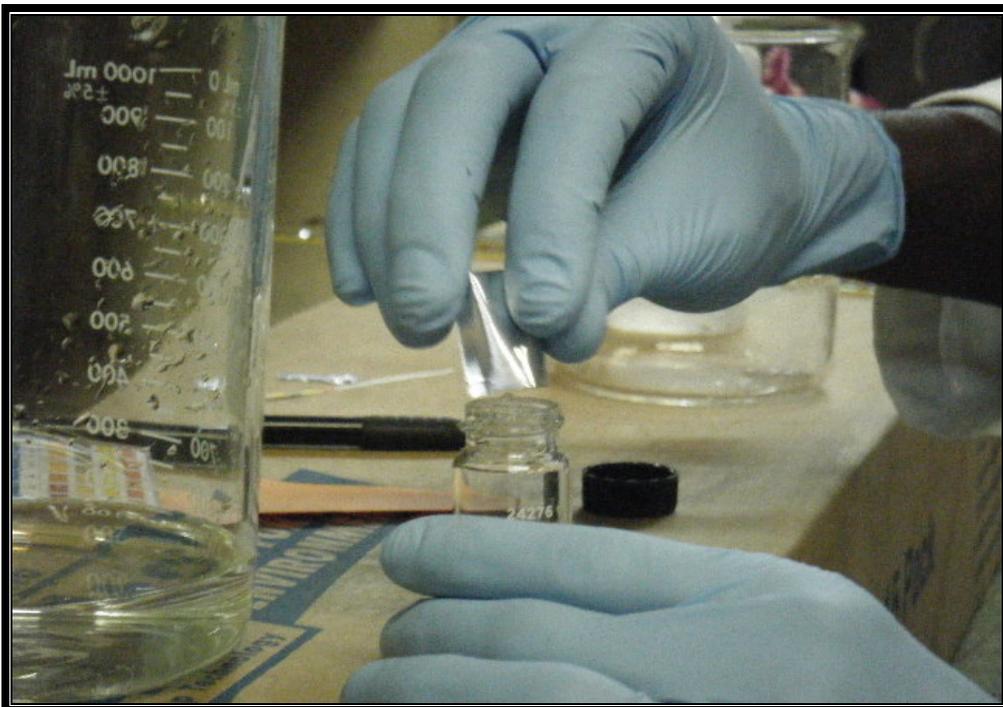
G- Para conocer la concentración del hipoclorito de sodio, se utilizó un Colorímetro Bolsillo P/cloro 58700-00 (fotografía 3.8).



Fotografía 3.8 Colorímetro bolsillo, sirve para medir la concentración de NaOCl

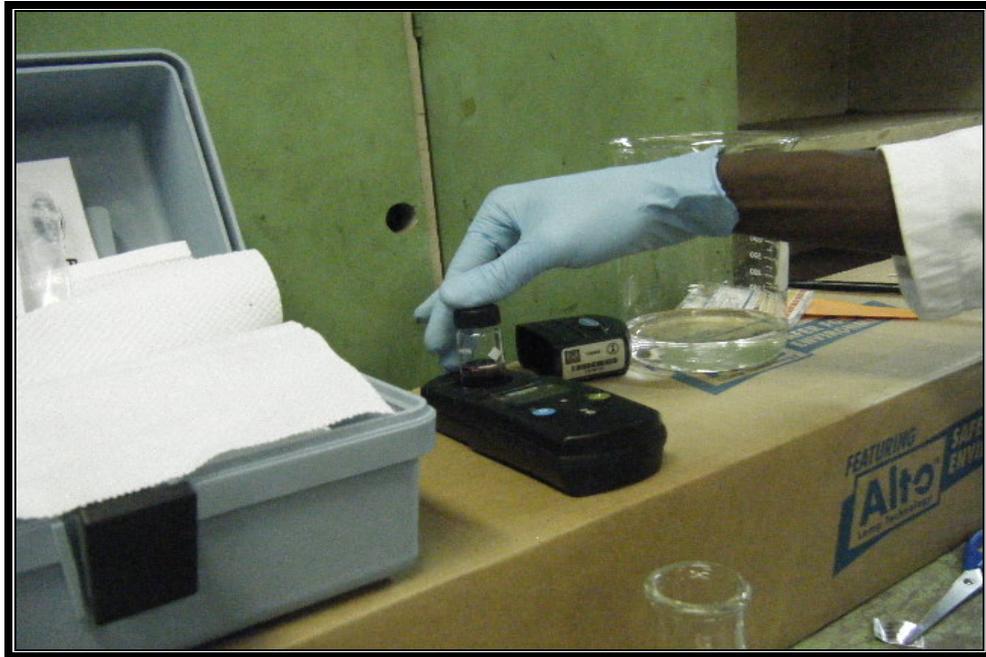
y se realizó la siguiente secuencia:

- 1- Se llena la celda de 10 ml hasta la marca blanca de 10 ml con la muestra a medir.
- 2- Se pulsa la tecla “**power**” para encender el medidor.
- 3- Se retira la tapa del instrumento y se coloca el blanco en el soporte porta celdas, con la marca del diamante hacia el teclado y al final se coloca la tapa del instrumento sobre el comportamiento para tapar la celda.
- 4- Se pulsa la tecla “ZERO/SCROLL”. La pantalla indicará “0.00”
- 5- Se llena otra celda de 10 ml hasta la marca de 10 ml con la muestra.
- 6- Se añade a la celda de análisis el contenido de un sobre de reactivo de cloro **libre** DPD en polvo o un sobre de reactivo de cloro **total** DPD en polvo (la muestra preparada), ver fotografía 3.9.



Fotografía 3.9 Muestra preparada

- 7- Se pone la tapa agitando el contenido cuidadosamente durante 20 segundos, ver fotografía 3.10.
- 8- Se coloca la celda con la muestra preparada en el soporte porta celdas.



Fotografía 3.10 Análisis de muestra

9.- Se coloca la tapa del instrumento sobre el compartimiento para tapar la celda, ver la fotografía 3.11.



Fotografía 6.11

10.- Y para terminar con la secuencia, se pulsa la tecla "READ/ ENTER" y la pantalla indicará la concentración de cloro en mg/l.



Fotografía 3.12 Análisis de muestra (última parte)

3.4.- Resultados de los experimentos en los cruces de tuberías

Este apartado, se dedicó especialmente al análisis de los resultados obtenidos en los experimentos de laboratorio. A continuación se presentan 9 tablas en las cuales se encuentran todos los detalles de cada escenario. Posteriormente se analizará cada tabla de manera separada, y se buscará los puntos comunes entre ellas y al final se tomará una conclusión a cerca de la teoría de mezcla en las salidas de los cruces de tuberías.

Análisis del muestreo de difusión de Sustancias Primera parte

Escenario: 1

Fecha del muestreo: 10 de mayo del 2009

Modelo físico: Cruces de Tuberías

Descripción: Cálculo de concentración

Sustancia: Hipoclorito de Sodio

Tipo de Cruce: 90 grados

Diámetro: 25.4 mm

Ubicación: Laboratorio Hidromecánico

	Cruces de tuberías				Tanques	
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Tanque 1 Con cloro	Tanque 2 Sin cloro
Capacidad En litros					450	1100
Gasto En litros/seg	0.21	0.72	0.39	0.54		
Concentración En mg/litros	0.56	0.04	0.03	0.27	0.56	0.04
Elevación En metros	1.04	1.04	1.04	1.04	0.95	1.23
Nivel Piezométrico En metros	1.08	1.11	1	1.02	1.7	2.26

Tabla 3.3 Resultados del escenario 1

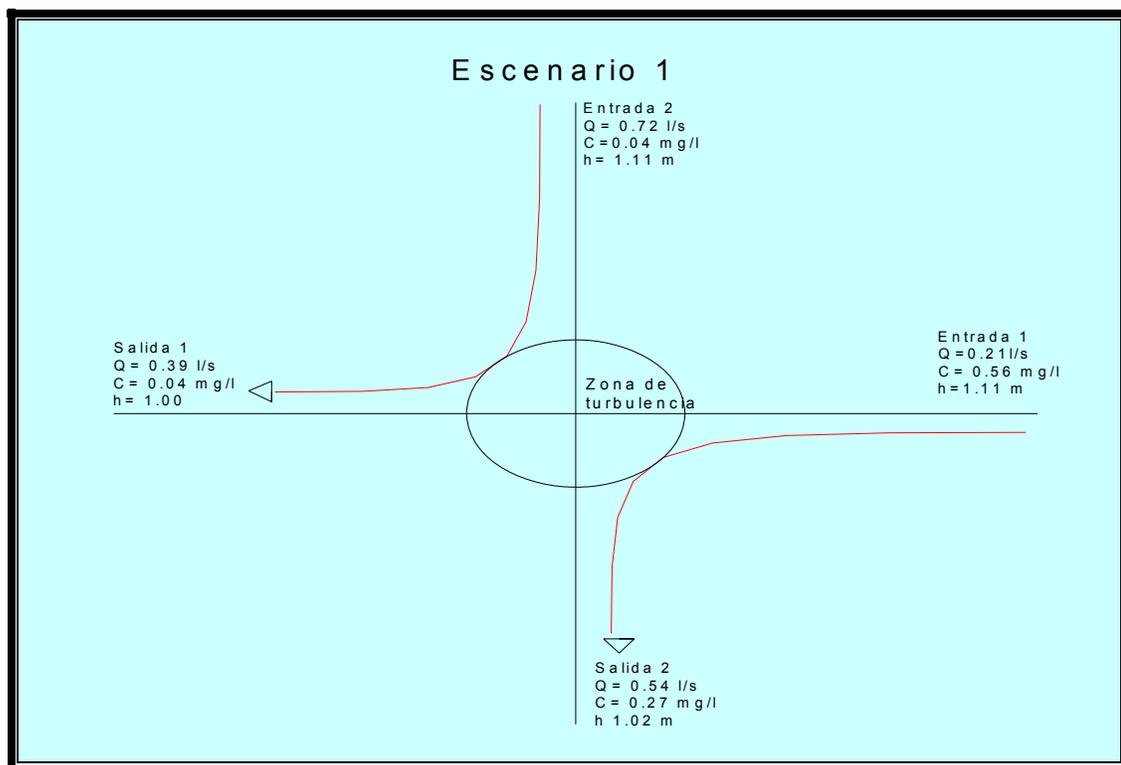


Figura 3.4 Interpretación geométrica del escenario 1

Análisis del muestreo de difusión de Sustancias

Escenario: 2

Fecha del muestreo: 13 de mayo del 2009

Modelo físico: Cruces de Tuberías

Descripción: Cálculo de concentración

Sustancia: Hipoclorito de Sodio

Tipo de Cruce: 90 grados

Diámetro: 25.4 mm

Ubicación: Laboratorio Hidromecánico

	Cruces de tuberías				Tanques	
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Tanque 1 Con cloro	Tanque 2 Sin cloro
Capacidad En litros					450	1100
Gasto En litros/seg	0.21	1.53	0.49	1.25		
Concentración En mg/litros	0.56	0.04	0.02	0.13	0.56	0.04
Elevación En metros	1	1	1	1	0.95	1.23
Nivel Piezométrico En metros	1.1	1.14	1.04	1.02	1.7	2.26

Tabla 3.4 Resultados del escenario 2

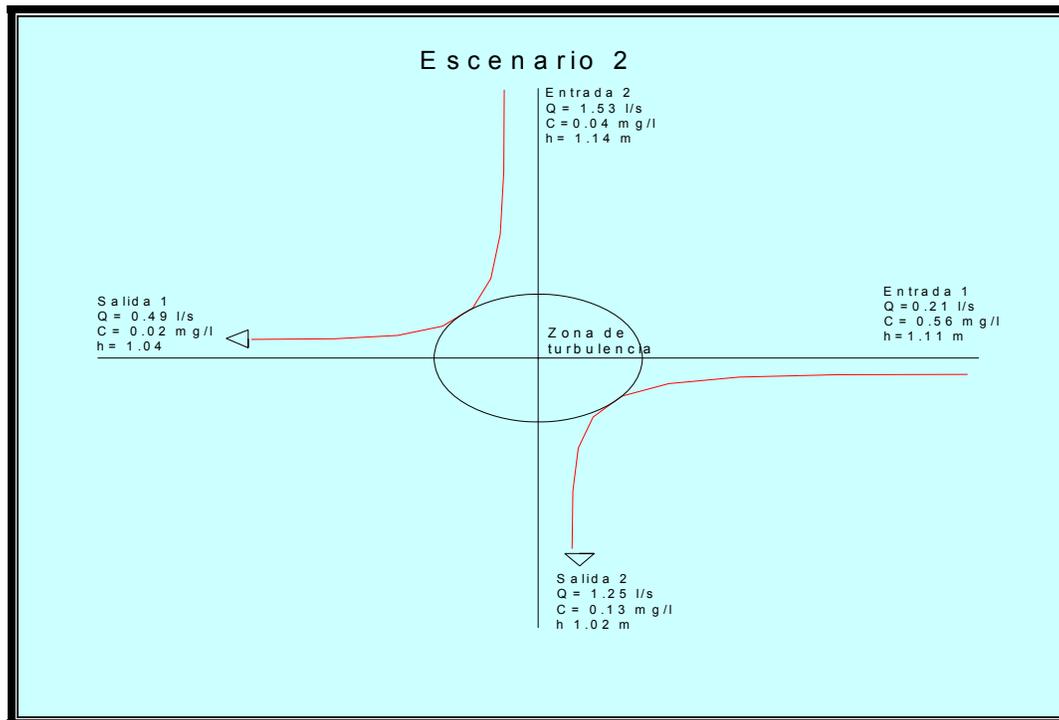


Figura 3.5 Interpretación geométrica del escenario 2

Análisis del muestreo de difusión de Sustancias Primera parte

Escenario: 3

Fecha del muestreo: 20 de mayo del 2009

Modelo físico: Cruces de Tuberías

Descripción: Cálculo de concentración

Sustancia: Hipoclorito de Sodio

Tipo de Cruce: 90 grados

Diámetro: 25.4 mm

Ubicación: Laboratorio Hidromecánico

	Cruces de tuberías				Tanques	
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Tanque 1 Con cloro	Tanque 2 Sin cloro
Capacidad En litros					450	1100
Gasto En litros/seg	0.72	0.72	0.66	0.78		
Concentración En mg/litros	1.5	0.03	0.05	1.13	0.56	0.04
Elevación En metros	1	1	1	1	0.95	1.23
Nivel Piezométrico En metros	1.14	1.16	1.06	1.04	1.45	1.99

Tabla 3.5 Resultados del escenario 3

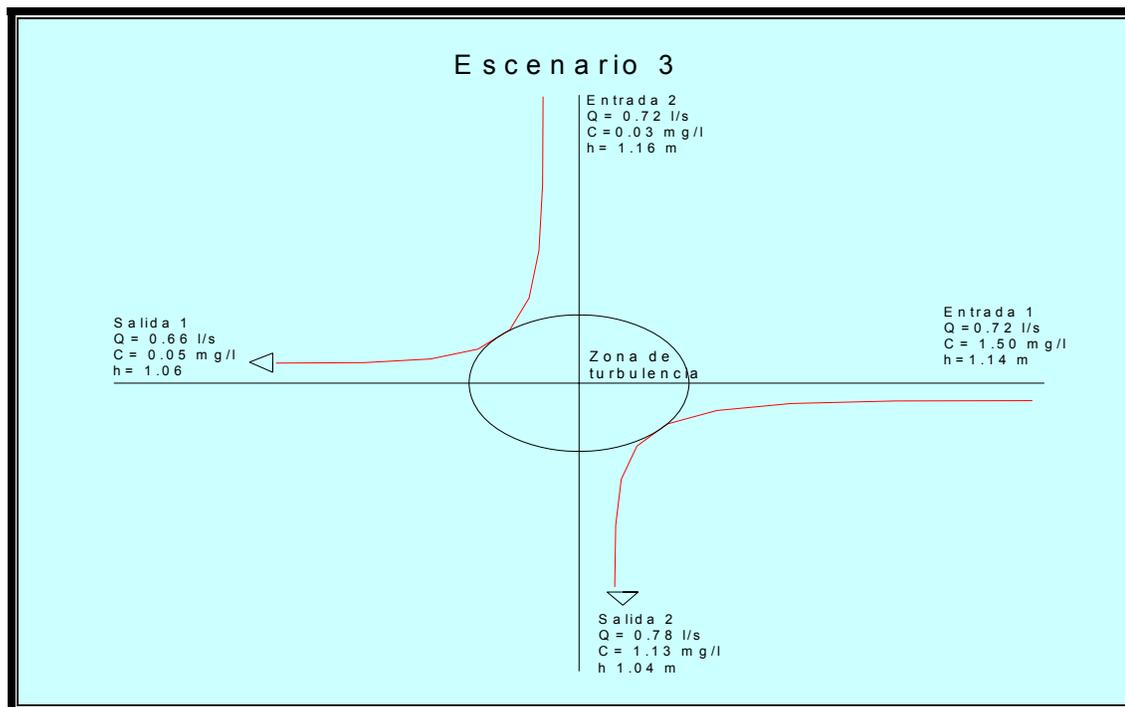


Figura 3.6 Interpretación geométrica del escenario 3

**Análisis del muestreo de difusión de Sustancias
Primera parte**

Escenario: 4

Fecha del muestreo: 16 de Mayo

Hora de muestreo: 13 AM

Modelo físico: Cruces de Tuberías

Descripción: Cálculo de concentración

Sustancia: Hipoclorito de Sodio

Tipo de Cruce: 45 grados

Diámetro: 25.4 mm

Ubicación: Laboratorio Hidromecánico

	Cruces de tuberías				Tanques	
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Tanque 1 Con cloro	Tanque 2 Sin cloro
Capacidad En litros					450	1100
Gasto En litros/seg	0.72	1.53	0.89	0.36		
Concentración En mg/l	1.35	0.03	0.03	0.62	1.35	0.03
Elevación En metros	1	1	1	1	0.95	1.23
Nivel Piezométrico En metros	1.25	1.2	1.06	1.04	1.35	1.83

Tabla 3.6 Resultados del escenario 4

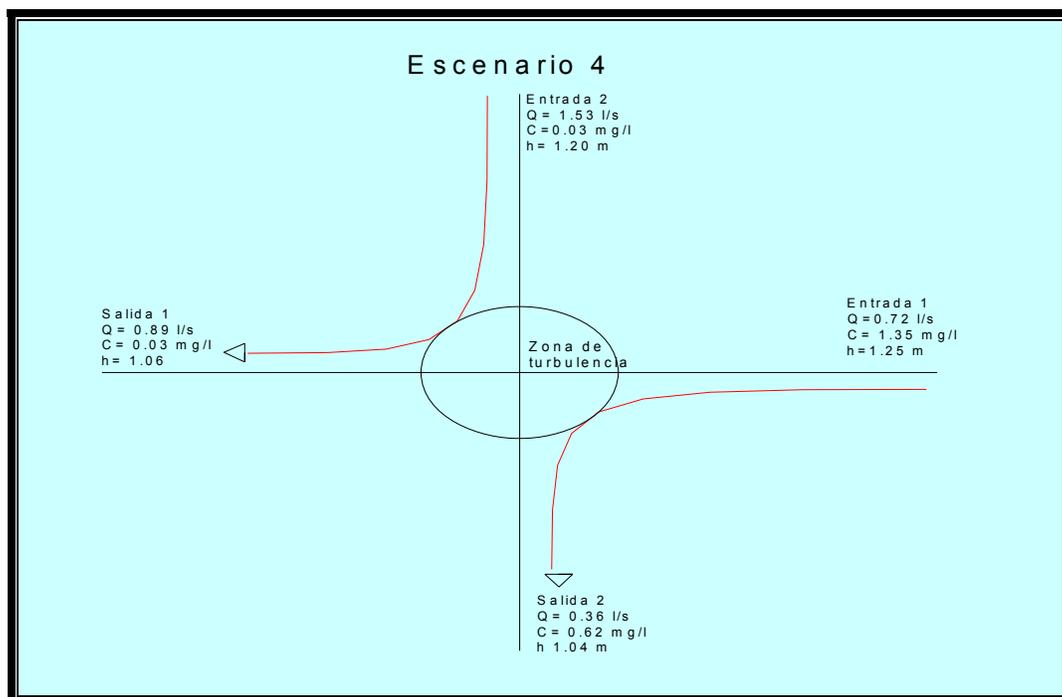


Figura 3.7 Interpretación geométrica del escenario 4

**Análisis del muestreo de difusión de Sustancias
Primera parte**

Escenario: 5
Fecha del muestreo: 20 de mayo del 2009
Modelo físico: Cruces de Tuberías
Descripción: Cálculo de concentración
Sustancia: Hipoclorito de Sodio
Tipo de Cruce: 45 grados
Diámetro: 25.4 mm
Ubicación: Laboratorio Hidromecánico

	Cruces de tuberías				Tanques	
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Tanque 1 Con cloro	Tanque 2 Sin cloro
Capacidad En litros					450	1100
Gasto En litros/seg	1.4	0.72	1.29	0.83		
Concentración En mg/litro	0.56	0.04	0.32	0.55	0.56	1.23
Elevación En metros	1	1	1	1	0.95	1.23
Nivel Piezométrico En metros	1.2	1.22	1.04	1.06	1.6	2.03

Tabla 3.7 Resultados del escenario 5

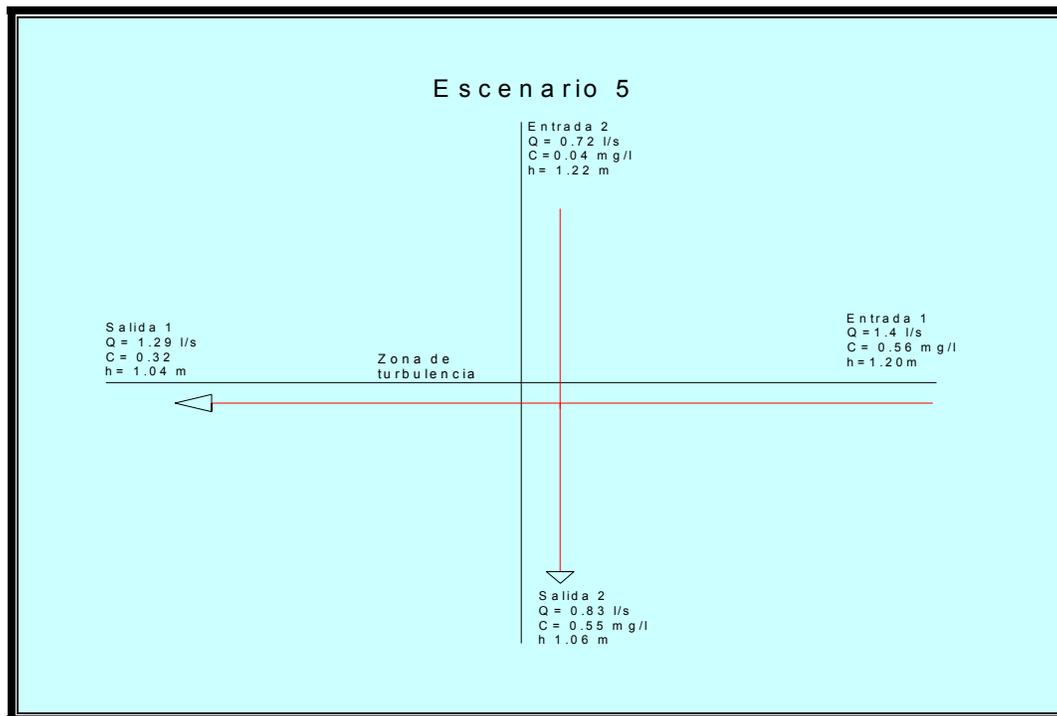


Figura 3.8 Interpretación geométrica del escenario 5

Análisis del muestreo de difusión de Sustancias Primera parte

Escenario: 6

Fecha del muestreo: 20 de mayo del 2009

Modelo físico: Cruces de Tuberías

Descripción: Cálculo de concentración

Sustancia: Hipoclorito de Sodio

Tipo de Cruce: 45 grados

Diámetro: 25.4 mm

Ubicación: Laboratorio Hidromecánico

	Cruces de tuberías				Tanques	
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Tanque 1 Con cloro	Tanque 2 Sin cloro
Capacidad En litros					450	1100
Gasto En litros/ seg	1.4	1.53	1.43	1.5		
Concentración En mg/l	0.43	0.04	0.03	0.25	0.43	0.04
Elevación En metros	1	1	1	1	0.95	1.23
Nivel Piezométrico En metros	1.2	1.22	1.02	1.04	1.49	2.09

Tabla 3.8 Resultados del escenario 6

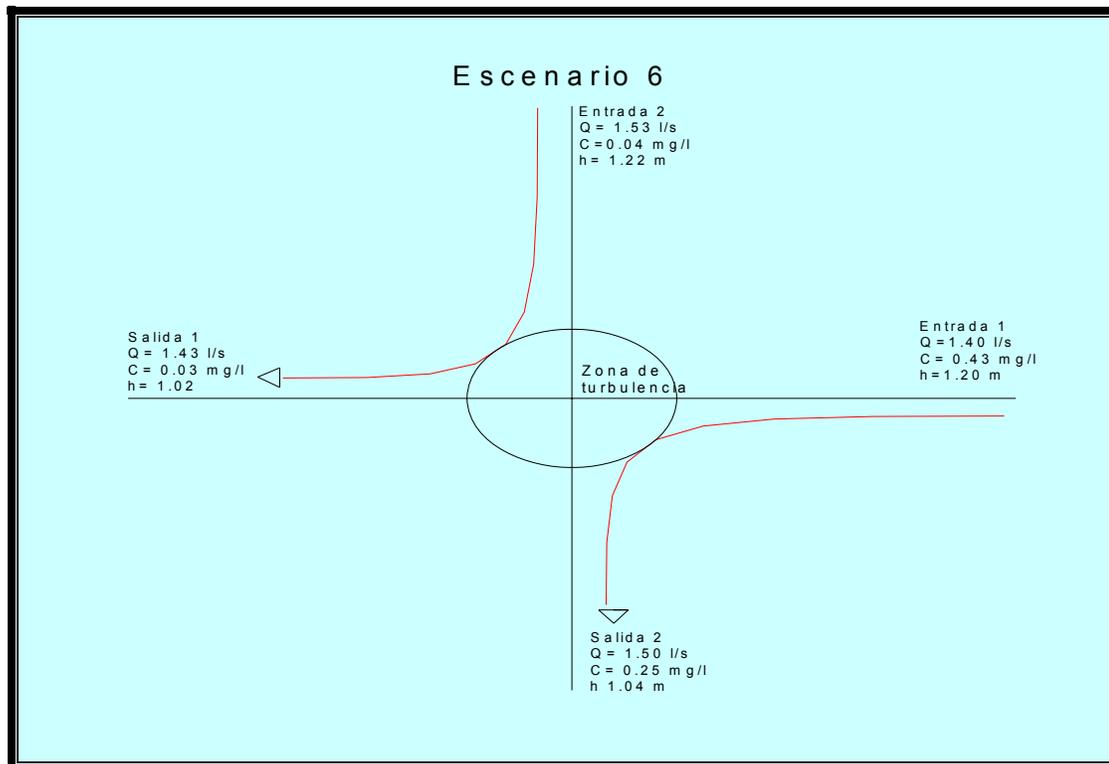


Figura 3.9 Interpretación geométrica del escenario 6

Análisis del muestreo de difusión de Sustancias Primera parte

Escenario: 7

Fecha del muestreo: 21 de mayo de 2009

Hora de muestreo: 11 AM

Modelo físico: Cruces de Tuberías

Descripción: Cálculo de concentración

Sustancia: Hipoclorito de Sodio

Tipo de Cruce: 90 grados

Diámetro: 25.4 mm

Ubicación: Laboratorio Hidromecánico

	Cruces de tuberías				Tanques	
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Tanque 1 Con cloro	Tanque Sin cloro
Capacidad En litros					450	1100
Gasto En litros/seg	0.21	1.35	0.36	1.2		
Concentración En mg/litros	1.72	0.03	0.04	0.52	1.72	0.03
Elevación En metros	1	1	1	1	0.95	1.23
Nivel Piezométrico En metros	1.17	1.13	1.04	1.06	1.47	2.17

Tabla 3.9 Resultados del escenario 7

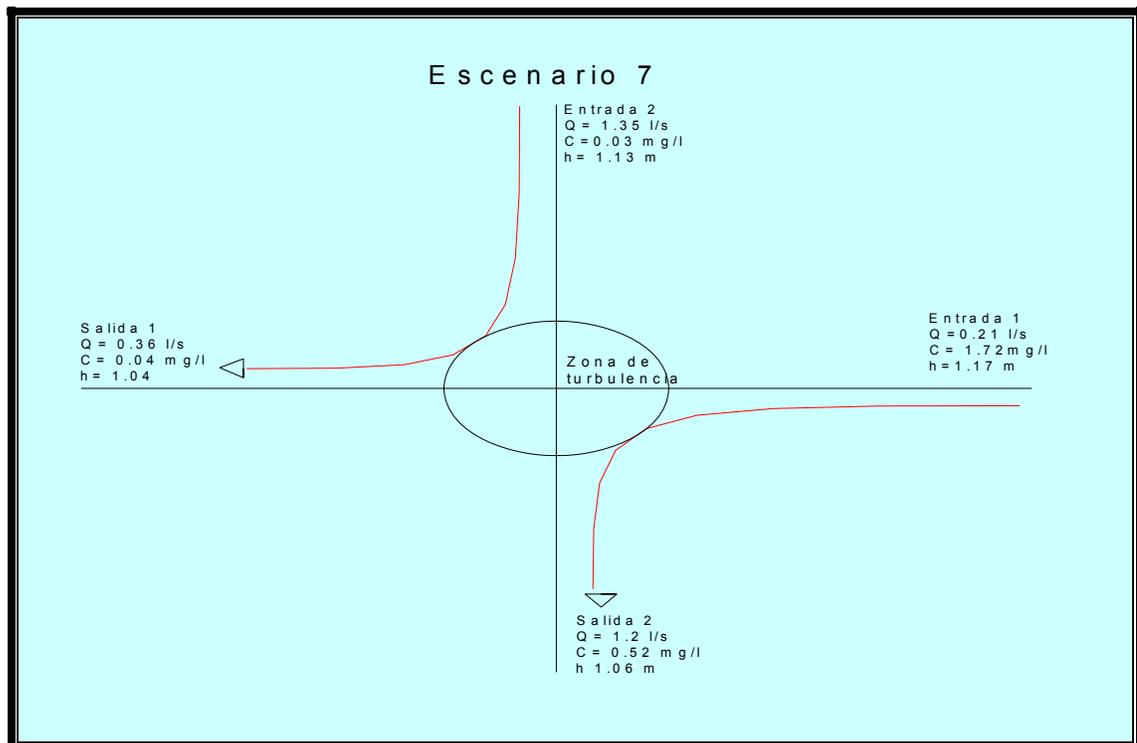


Figura 3.10 Interpretación geométrica del escenario 7

Análisis del muestreo de difusión de Sustancias Primera parte

Escenario: 8

Fecha del muestreo: 22 de Mayo de 2009

Hora de muestreo: 12 AM

Modelo físico: Cruces de Tuberías

Descripción: Cálculo de concentración

Sustancia: Hipoclorito de Sodio

Tipo de Cruce: 90 grados

Diámetro: 25.4 mm

Ubicación: Laboratorio Hidromecánico

	Cruces de tuberías				Tanques	
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Tanque 1 Con cloro	Tanque 2 Sin cloro
Capacidad En litros					450	1100
Gasto Litros/seg	0.72	1.35	0.87	1.2		
Concentración En mg/litros	0.5	0.04	0.04	0.28	0.5	0.04
Elevación En metros	1	1	1	1	0.95	1.23
Nivel Piezométrico En metros	1.28	1.26	1.04	1.06	1.6	2.03

Tabla 3.10 Resultados del escenario 8

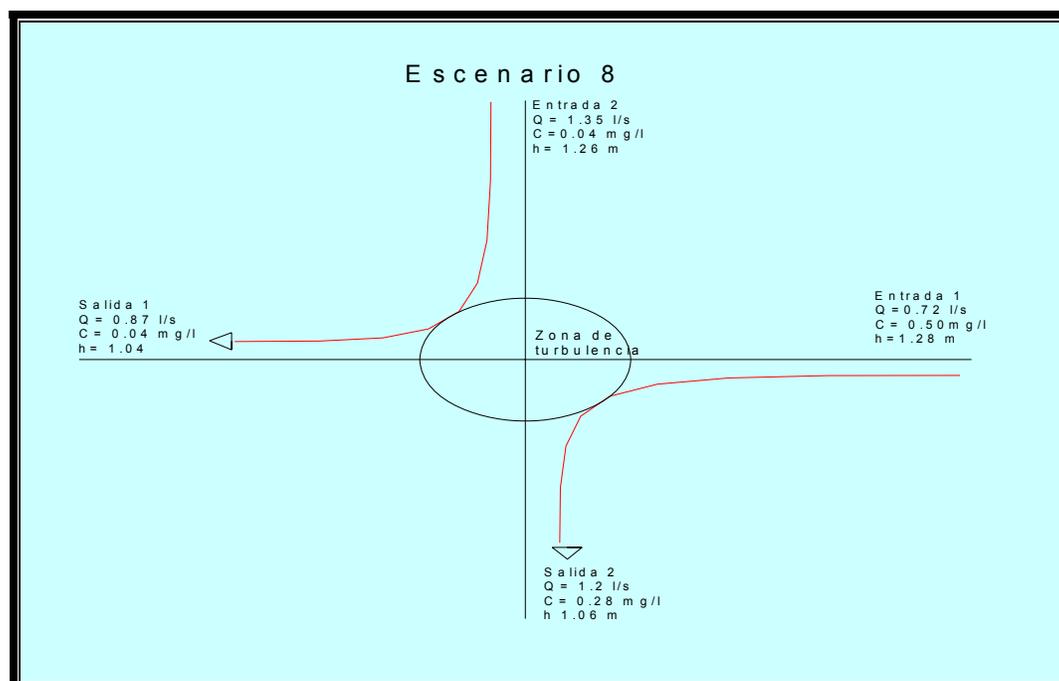


Figura 3.11 Interpretación geométrica del escenario 8

Análisis del muestreo de difusión de Sustancias Primera parte

Escenario: 9

Fecha del muestreo: 23 de mayo de 2009

Hora de muestreo: 10 AM

Modelo físico: Cruces de Tuberías

Descripción: Cálculo de concentración

Sustancia: Hipoclorito de Sodio

Tipo de Cruce: 90 grados

Diámetro: 25.4 mm

Ubicación: Laboratorio Hidromecánico

	Cruces de tuberías				Tanques	
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Tanque 1 Con cloro	Tanque 2 Sin cloro
Capacidad En litros					450	1100
Gasto Litros/seg	1.4	1.35	1.29	1.46		
Concentración mg/litros	0.43	0.04	0.2	0.25	0.43	0.04
Elevación En metros	1	1	1	1	0.95	1.23
Nivel Piezométrico En metros	1.47	1.45	1.04	1.04	1.34	1.97

Tabla 3.11 resultados del escenario 9

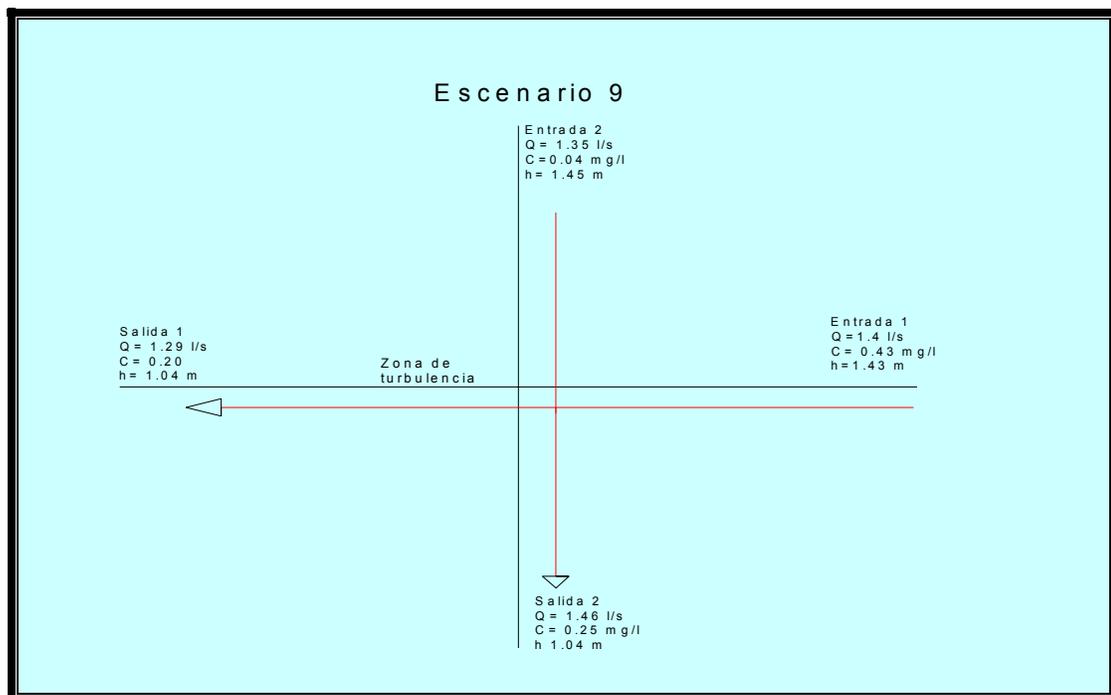


Figura 3.12 Interpretación geométrica del escenario 9

3.5.- Interpretación de resultados

En las Tablas 3.3 a 3.11 se presentan los 9 escenarios de variación de gastos que se trabajaron, aquí puede observarse que en 7 de los 9 escenarios el gasto de salida del tanque No.1 es menor que el de salida del tanque No.2, en uno los escenarios se trabajó con gastos iguales y en dos escenarios el gasto de salida del tanque No. 1 es mayor que el salida del tanque No. 2.

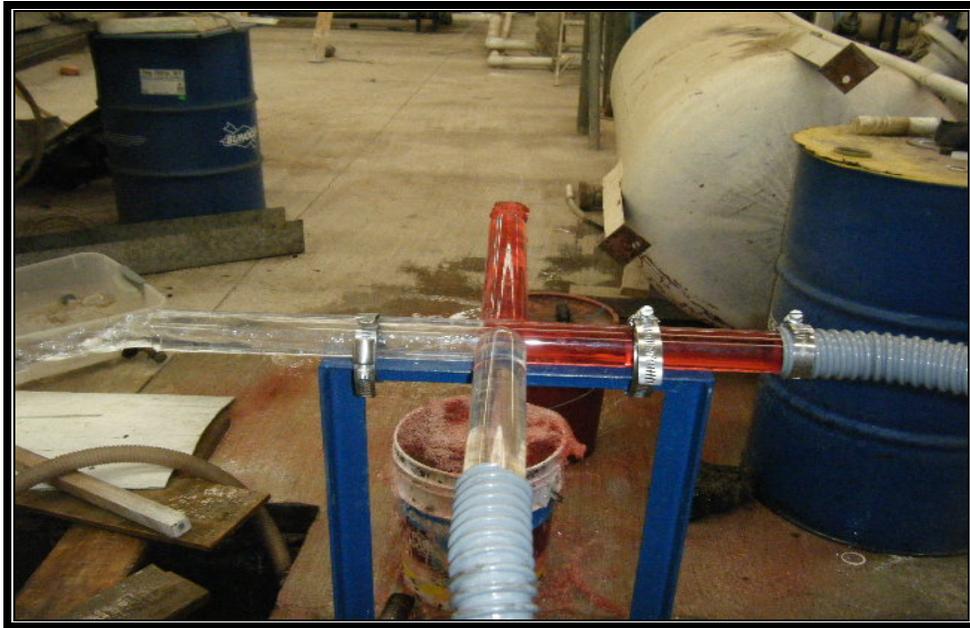
Según los resultados obtenidos en las tablas 3.3 a 3.6 y de la 3.8 a 3.10 se pueden observar que la teoría de mezcla en cruces de tuberías se aplica solo cuando el flujo de salida del tanque No. 2, es decir sin cloro, entra en el cruce con un gasto mayor o igual.

Por otro lado cuando el caudal que contiene el hipoclorito de sodio entra al cruce con un gasto mayor, se presenta el mezclado y la concentración de hipoclorito de sodio a la salida de las dos tuberías es casi igual.

De manera adicional se puede mencionar que durante estas pruebas se encontró que la degradación del hipoclorito de sodio (NaOCl) no solamente depende del tiempo y la temperatura sino que también está en función de la turbulencia.

Sí se analiza los resultados de la tabla 3.3, se puede observar que el hipoclorito de sodio presenta una degradación de hasta un 52 %. El flujo de salida del tanque 1 tiene una concentración de 0.56 mg/l, después de un recorrido de 8 m la concentración se mantuvo en 0.56 mg/l, pero después del choque con el otro flujo de concentración 0.03 mg/l, se observó que en la salida 1 la concentración del flujo es cercana a cero y en la salida 2 la concentración es igual a 0.27mg/l o sea 46% menos . Se encontró el mismo comportamiento en los otros casos. Cabe mencionar que este porcentaje puede aumentar o disminuir bajo ciertas condiciones; por ejemplo con la relación de variación de los flujos.

Con el propósito de visualizar físicamente el fenómeno del mezclado, se utilizó un trazador (colorante artificial para alimentos, **Rojo grosella**). Se utilizaron los mismos gastos y se obtuvieron los mismos resultados. En las siguientes fotografías se observa como los dos flujos salieron del cruce guardando su individualidad después de haberse encontrado en el cruce. Eso es debido a que el flujo sin trazador entro con una concentración mayor o igual al que tiene el colorante. Fotografías 3.14 y 3.15



Fotografía 3.13 Flujos en salidas de cruces sin mezcla



Fotografías 3.14 Flujos en salidas de cruces sin mezcla

Como se puede observar, los dos flujos se encuentran en el cruce y los dos salieron conservando su individualidad. También se pudo observar una reducción del porcentaje del colorante en la salida. En la fotografía 3.15 se analizan 3 muestras en 3 vasos. El primer vaso contiene la muestra del tanque 1 y los otros dos vasos son muestras de las salidas. Se observa que la muestra en la salida está más clara que la del tanque 1. Así podemos concluir que no hubo una mezcla pero sí hubo pérdida de concentración.



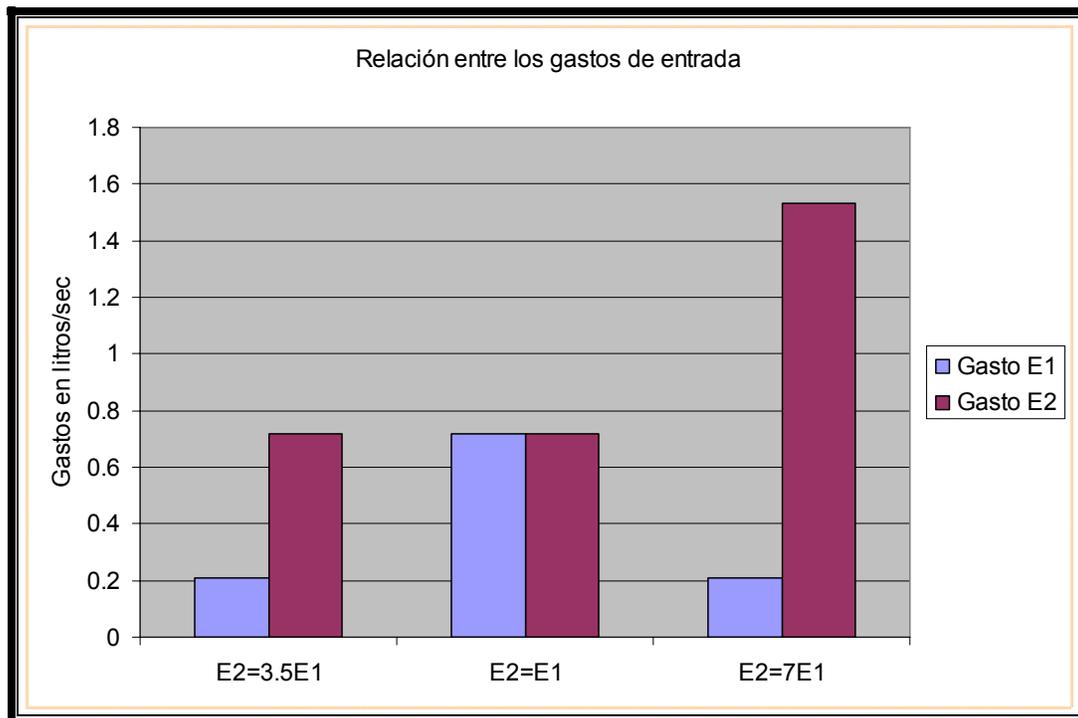
Fotografía 3.15 muestras en salidas de cruces

Como se mencionó anteriormente, la degradación del Hipoclorito de Sodio en un cruce de tubería puede ser mayor o menor según sus condiciones. Si se observa nuevamente las tablas 3.3, 3.4, 3.6, 3.9 y 3.10 y se hace una relación entre los gastos de entradas, se puede observar que las pérdidas se aumenten cada vez que la relación entre el flujo no clorado es mucho mayor que el otro. A medida que aumenta el flujo, aumenta la degradación. Si se analizan sucesivamente los gastos de las tablas, se puede apreciar que en la primera el gasto de entrada E2 es igual a 3.5 del gasto de entrada E1. También se ve que la concentración inicial es de 0.56 mg/l y la concentración final es de 0.27 mg/l, o sea una disminución del 52%. En la Tabla 3.4 el gasto E2 vale 7 veces E1, la concentración inicial de 0.56 mg/l salió a 0.13, con una disminución del 77%. Cuando los gastos E1 y E2 son iguales, se obtuvo una pérdida menor, fue lo que ocurrió en el escenario 3 donde E1 es igual a E2 y hubo una pérdida del 25%. En el escenario 4 hubo una pérdida del 44%, en el escenario 7 hubo una pérdida del 70%.

A continuación se presentan las gráficas 3.12 a 3.15 correspondientes a cada escenario en función de la relación entre los gastos de entradas E1 y E2 y de las concentraciones en las salidas de los cruces que son los resultados obtenidos durante las pruebas, lo que permite una mejor comprensión de estos. Primero se presenta la tabla 3.12 y su gráfica 3.1, en las cuales se encuentran las relaciones entre los gastos y los valores de la concentración en mg/l, posteriormente en la tabla 3.13 se presentan las concentraciones a las salidas, por su parte la tabla 3.13 y gráfica 3.2 muestran las concentraciones de cloro bajo las condiciones especificadas y las gráficas 3.3 y 3.6 representan el porcentaje de las pérdidas en la concentración en las tuberías de salida.

Relación entre los gastos de entrada	Gasto de entrada con cloro, E1 (l/s)	Gasto de entrada Sin cloro, E2 (l/s)
E2=3.5E1	0.21	0.72
E2=E1	0.72	0.72
E2=7E1	0.21	1.53

Tabla 3.12 Relación entre los gastos de entrada E1 y E2

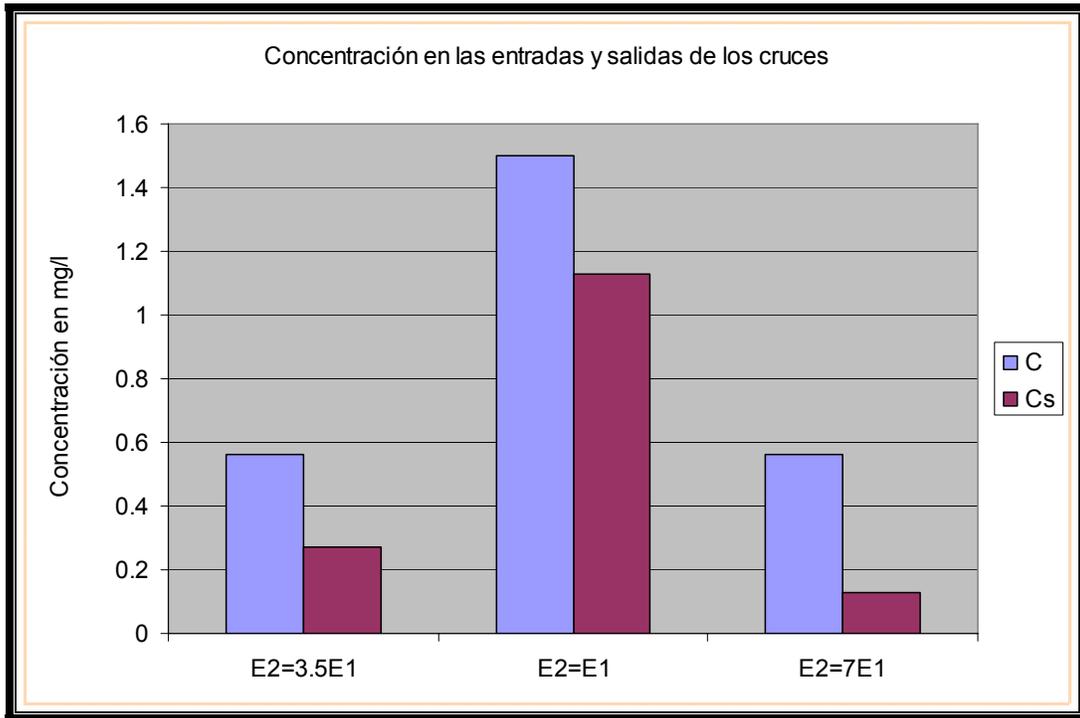


Gráfica 3.1 Relación entre los gastos de entrada E1 y E2

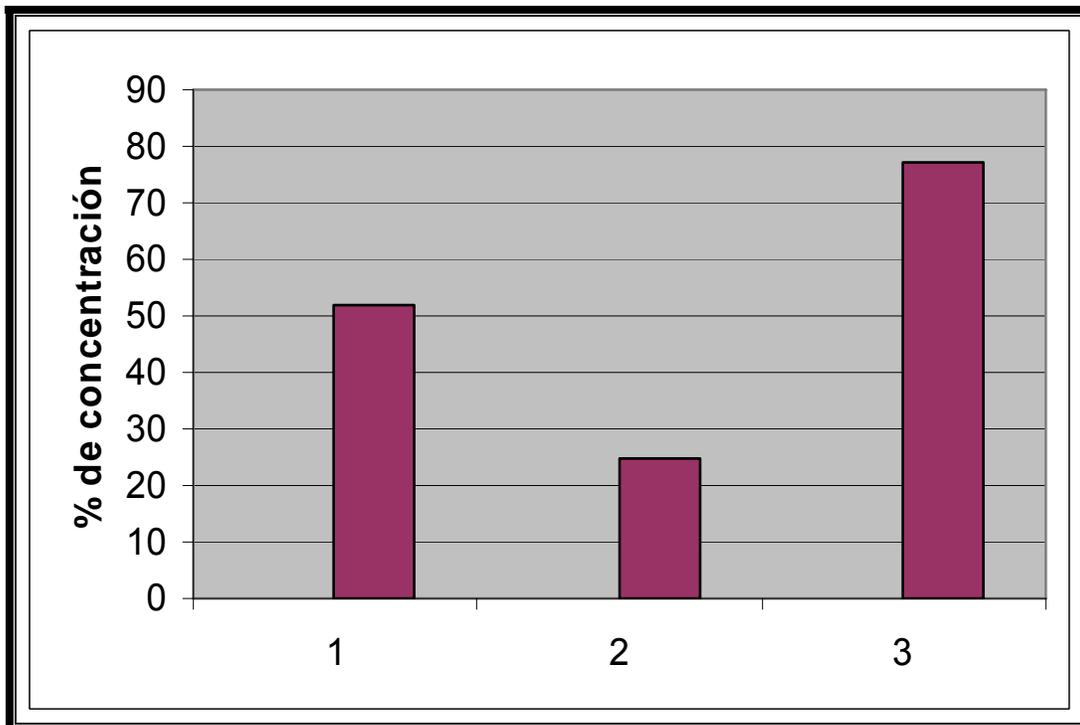
Relación entre Los gastos de entrada	Concentración En la entrada C (mg/l)	Concentración En la salida Cs (mg/l)
E2=3.5E1	0.56	0.27
E2=E1	1.5	1.13
E2=7E1	0.56	0.13

Tabla 3.13 Concentración en las salidas de cruces de tuberías

En esta tabla, E1 designa el gasto que sale del tanque 1 y E2 representa el gasto que sale en tanque 2.



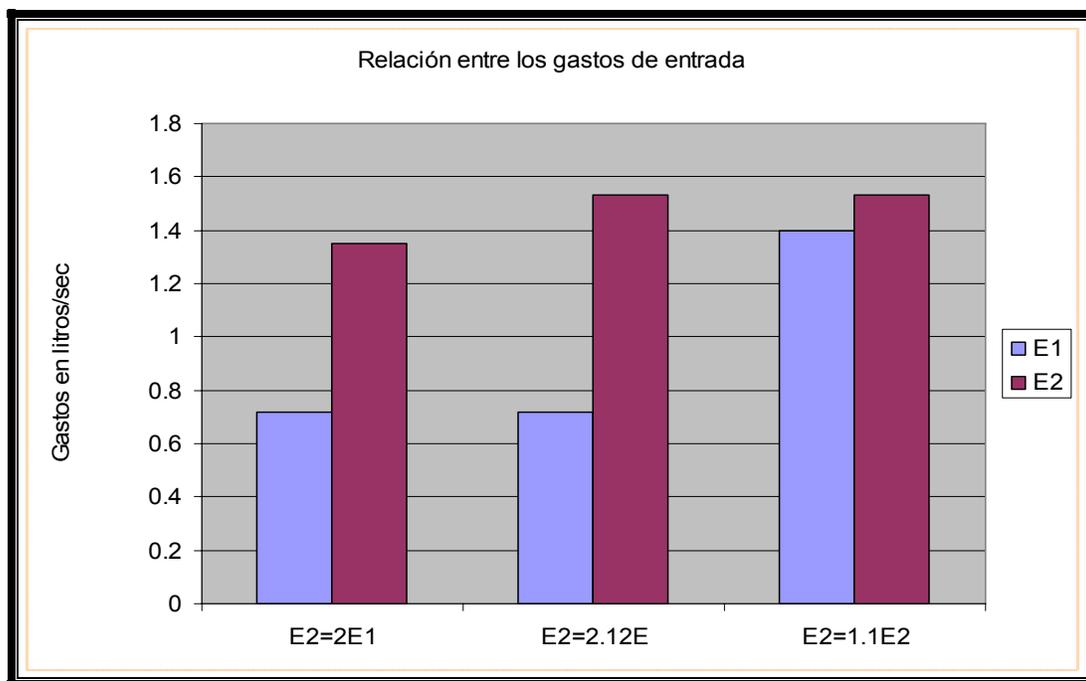
Gráfica 3.2 Concentración en las salidas en cruces de tuberías



Gráfica 3.3 Porcentaje de pérdidas en las salidas de cruces de tuberías

Relación entre Los gastos de entrada	Gasto de entrada con cloro, E1	Gasto de entrada sin cloro, E2
E2= 2E1	0.72	1.35
E2=9E1	0.72	1.53
E2=1.1E1	1.4	1.53

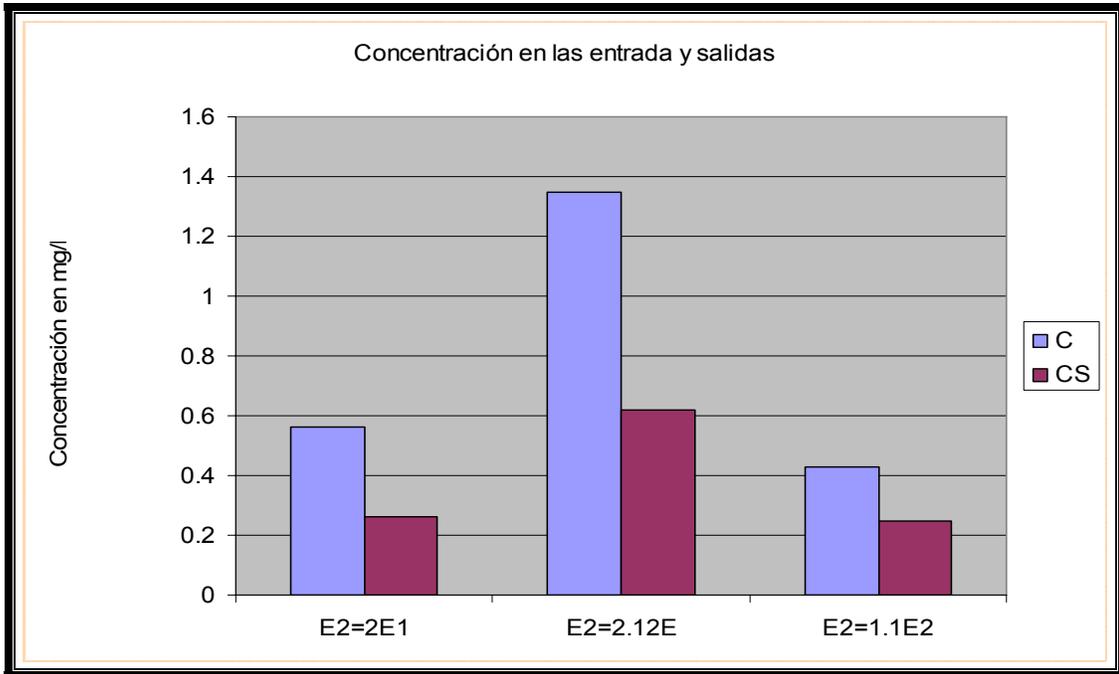
Tabla 3.14 Relación entre los gastos de entrada E1 y E2



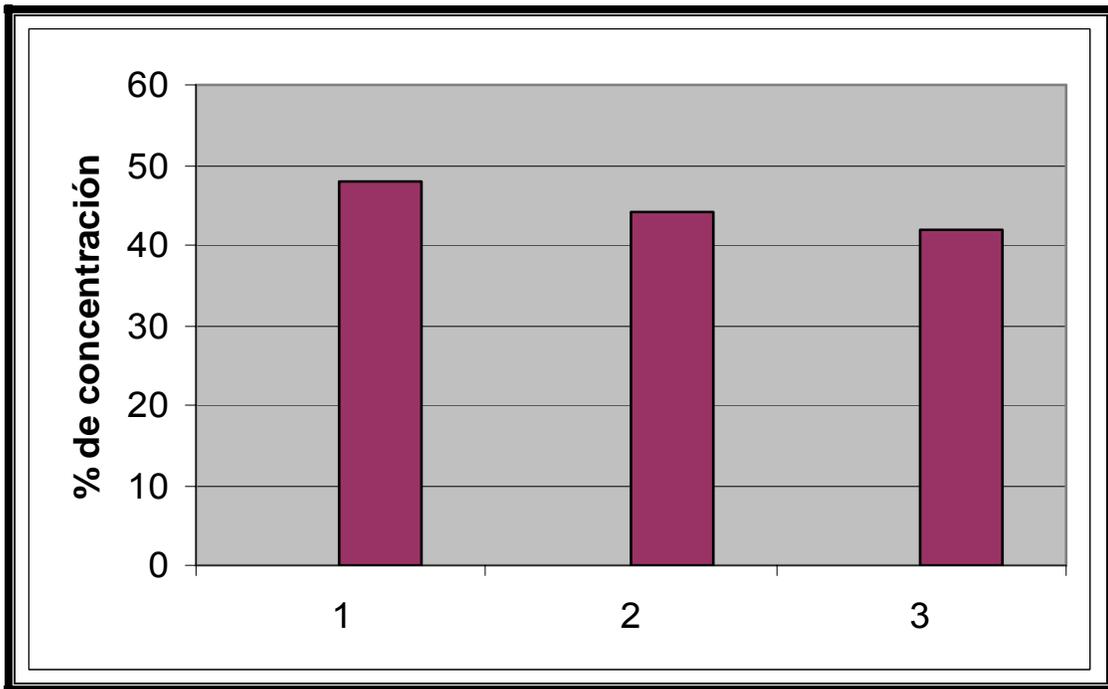
Grafica 3.4 Relación entre los gastos de entrada E1 y E2

Relación entre Los gastos de entrada	Concentración En la entrada C1 (mg/l)	Concentración En la salida CS2 (mg/l)
E2= 1.9E1	0.56	0.26
E2=2.1E1	1.35	0.62
E2=1.1E1	0.43	0.25

Tabla 3.15 Concentración en las salidas de cruces de tuberías



Gráfica 3.5 Concentración en las salidas de cruces de tuberías



Gráfica 3.6 Porcentaje de perdidas en las salidas de cruces de tuberías

Como se pudo apreciar en las gráficas 3.1 al 3.6, la turbulencia es un factor de degradación del hipoclorito de sodio en un cruce de tuberías. Mientras más grande es la turbulencia, más grande es la pérdida. Nada más en los dos casos donde los gastos son casi similares, se pudo apreciar una diferencia del 17%. A continuación se analiza el otro caso que se presentó en las pruebas, el cual fue la mezcla de los dos flujos entrantes al cruce después de haber chocado. Como se explicó anteriormente este fenómeno se produjo debido a que el flujo que tiene el sustancia (Cloro o trazador) entra con un gasto mayor que el otro. En las siguientes Fotografías 3.16 al 3.18, se puede observar que los dos flujos después de haber chocado en la intersección del cruce, salen con una cierta mezcla. Si se revisa los resultados del escenario 9 de la tabla 3.11, se observa que en la entrada 1 el flujo tenía una concentración de 0.43 mg/l y en la entrada 2, una concentración de 0.04, también se observa que en las dos salidas, los flujos salen con una mezcla de 0.20 y 0.25 mg/l. Estos mismos resultados se repitieron en las pruebas del escenario 05 de la tabla 3.7.



Fotografía 3.16 Mezcla de flujos entrantes en los cruces de tuberías



Fotografía 3.17 mezcla de flujos entrantes en cruces de tuberías



Fotografía 3.18 Choques de flujos entrantes en cruces de tuberías



Fotografía 3.18 Muestras de agua de tuberías salientes después de mezclar

3.6.- Análisis de muestreo de difusión de sustancias

Para comprobar los resultados obtenidos en las pruebas anteriores y aplicar los resultados en una red de agua potable, fue necesario realizar otras pruebas por una parte con los cruces y por otra parte en una red de tuberías.

Los dispositivos fueron trasladados e instalados en otro laboratorio con el fin de obtener una mejor carga y una maniobra más adecuada durante las pruebas.

Las características de las instalaciones se quedaron iguales como se mencionó anteriormente. Para obtener los gastos en las entradas de los cruces, se realizaron nuevos aforos volumétricos cuyos resultados se encuentran en la tabla 3.16.

AFORO VOLUMÉTRICO		
GASTOS	GASTO EN LA SALIDA DEL TANQUE 1 (l/s)	GASTO EN LA SALIDA DEL TANQUE 2 (l/s)
1	0.21	0.32
2	0.39	0.45
3	1.00	0.72
4	1.35	1.1.35
5	1.4	1.53

Tabla 3.16 Resultado del aforo volumétrico (2ª parte)

Obtenidos los gastos, se realizaron una serie de pruebas, primero con un gasto menor del líquido que contiene el cloro y posteriormente con un gasto mayor. A continuación se presenta los resultados obtenidos durante estos escenarios.

RESULTADOS DE DIFUSIÓN DEL CLORO EN UN CRUCE DE TUBERÍAS		
Escenario 1	Gasto (l/s)	Concentración (mg/l)
Entrada1	0.21	0.56
Entrada 2	0.72	0.04
Salida 1	0.39	0.03
Salida 2	0.54	0.27
Escenario 2		
Entrada1	0.21	1.72
Entrada 2	1.35	0.04
Salida 1	0.36	0.04
Salida 2	1.2	0.52
Escenario 3		
Entrada1	0.21	0.56
Entrada 2	1.53	0.04
Salida 1	0.49	0.02
Salida 2	1.25	0.13
Escenario 4		
Entrada1	0.72	0.5
Entrada 2	1.35	0.04
Salida 1	0.87	0.04
Salida 2	1.2	0.17

Tabla 3.17 Resultados de los escenarios 1 al 5 (2ª parte)

3.7- Análisis de resultados

Como se mencionó en los análisis anteriores con respecto a la teoría de mezcla, para que dos flujos de concentraciones diferentes se mezclen en un cruce de tubería debe de existir una relación de superioridad del gasto del líquido que contiene la sustancia, en el caso contrario nunca habrá mezcla. Como se puede apreciar en la tabla 3.17, no hubo mezcla durante estos escenarios debido a que los gastos del flujo que no tiene el cloro son mayores.

RESULTADOS DIFUSION DEL CLORO EN CRUCE DE TUBERÍAS		
Escenario 8	Gasto	Concentración
Entrada1	0.52	1.34
Entrada 2	0.45	0.02
Salida 1	0.25	0.32
Salida 2	0.31	0.55
Escenario 9		
Entrada1	1.4	0.43
Entrada 2	1.35	0.04
Salida 1	1.29	0.2
Salida 2	1.46	0.2
Escenario 10		
Entrada1	1.35	1.3
Entrada 2	0.32	0.01
Salida 1	1.04	0.66
Salida 2	0.72	1.3
Escenario 11		
Entrada1	1	1.3
Entrada 2	0.32	0.01
Salida 1	0.76	0.65
Salida 2	0.56	1.28
Escenario 12		
Entrada1	1.35	1.3
Entrada 2	0.72	0.01
Salida 1	1.17	0.36
Salida 2	0.93	1.04

Tabla 3.18 Resultados de los escenarios 8 al 12 (2ª parte)

A diferencia de los resultados de los escenarios 1 al 4 de la tabla 3.17 en los cuales los flujos tienden a rechazar su mezcla, los resultados de la tabla 3.18 son diferentes debido a que los gastos del líquido que contiene mayor concentración de sustancia es mayor al gasto del líquido con menor concentración por eso se presenta una mezcla en las tuberías salientes de los cruces.

3.8 Procedimiento de cálculo de concentración en las salidas.

Con base a los experimentos de laboratorio, la teoría de mezcla se puede resumir en la manera siguiente:

Cuando el gasto del líquido con mayor concentración de sustancia es menor al gasto del líquido con menor concentración no habrá mezcla.

Cuando el gasto del líquido con mayor concentración de sustancia es mayor al gasto del líquido con menor concentración si habrá mezcla. En este caso se considera que la cantidad de masa de la sustancia que llega al cruce se distribuye de tal manera que la cantidad de movimiento de la sustancia sea igual en los tubos salientes del cruce.

Se plantea en estos casos que:

$$(E_1 C_1 + E_2 C_2) \Delta t = M \dots \dots \dots (3.1)$$

$$(C_{s1} q_1 + C_{s2} q_2) \Delta t = M \dots \dots \dots (3.2)$$

$$C_{s1} q_1 \Delta t = C_{s2} q_2 \Delta t \dots \dots \dots (3.3)$$

donde:

E_1 y E_2 son los gastos de entrada

C_1 y C_2 son las concentraciones de entrada

q_1 y q_2 son los gastos de salida

C_{s1} y C_{s2} son las concentraciones en las salidas

M : la cantidad de masa

Δt : incremento en el tiempo

Los gastos y las concentraciones de entrada son conocidos, se desarrolló una fórmula para calcular las concentraciones en las salidas

De la ecuación 3.3 se derive, la ecuación para calcular la concentración en a salida 2.

$$C_{s2} = \frac{C_{s1} q_1}{q_2} \dots \dots \dots (3.4)$$

Sustituyendo el valor de C_{s2} en la ecuación 3.2 se obtiene:

$$\left[C_{s1} q_1 + \left(\frac{C_{s1} q_1}{q_2} \right) q_2 \right] \Delta t = M \dots \dots \dots (3.5)$$

$$C_{s1} = \frac{M}{2 q_1 \Delta t} \dots \dots \dots (3.6)$$

3.9- Aplicación de la fórmula desarrollada en los cruces de tuberías

A continuación, se presenta una tabla en la cual se comparan los resultados obtenidos en las pruebas de los cruces, y los resultados obtenidos a partir de la fórmula establecida. Ecuaciones 3.4 y 3.6.

RESULTADO EXPERIMENTAL					RESULTADO NUMÉRICO	
Prueba 5	GASTOS (l/s)	CONCENTRACIÓN (mg/l)	MASA	MASA		
Entrada1	0.52	1.34	0.6968	0.7058		
Entrada 2	0.45	0.02	0.009			
Salida 1	0.25	1.2	0.3			
Salida 2	0.31	1	0.31	0.61		
					1.4116	Ecuación 3.4
					1.13838	3.6
Prueba 6						
Entrada1	1.4	0.43	0.602	0.656		
Entrada 2	1.35	0.04	0.054			
Salida 1	1.29	0.2	0.258			
Salida 2	1.46	0.2	0.292	0.55		
Prueba 7					0.2542	Ecuación 3.4
Entrada1	1.35	1.3	1.755	1.7582	0.2246	Ecuación 3.6
Entrada 2	0.32	0.01	0.0032			
Salida 1	1.04	0.66	0.6864			
Salida 2	0.72	1.3	0.936	1.6224		
					0.8452	Ecuación 3.4
Prueba 8					1.2209	Ecuación 3.6
Entrada1	1	1.3	1.3	1.3032		
Entrada 2	0.32	0.01	0.0032			
Salida 1	0.76	0.65	0.494			
Salida 2	0.56	1.28	0.7168	1.2108		
					0.8573	Ecuación 3.4
					1.1635	Ecuación 3.6

Tabla 3.19 Comparación entre resultados experimentales y numéricos

De acuerdo con los resultados obtenidos en las tablas 3.19 y 3.21, se pudo validar la fórmula que se estableció para calcular las concentraciones en las salidas en los cruces de tuberías y se observa que existe un error 1 a 2.5% entre los resultados, pero insignificante.

3.10- Experimentos en la red de agua.

En cuanto a las pruebas realizadas en la red de agua diseñada en el laboratorio del Instituto de Ingeniería UNAM, cuyas características fueron descritas anteriormente en el punto 3.2, se utilizó la misma sustancia (hipoclorito de sodio), se abasteció de agua con los dos tanques del modelo de los cruces y se empleó el mismo método (aforo volumétrico).

3.10.1 Medición de gasto en los nudos

La medición de los gastos en la salida de las válvulas, se obtuvo por aforos volumétricos.

3.10.2- Medición de concentración

Para medir la concentración se utilizó el procedimiento descrito en el apartado 3.3.3.

3.10.3- Cálculo de gastos en las tuberías

Con respecto a los gastos en las tuberías, se utilizó el programa TUBO FLU diseñado por el Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles, cuyo propósito es calcular los parámetros necesarios en los cálculos de redes de tuberías como: gasto, pérdida de carga, coeficiente de fricción, entre otros. Conociendo los datos básicos de la tubería como su longitud, diámetro, rugosidad, se puede calcular el gasto que circula a través de esta tubería; con la diferencia entre los piezómetros en los dos extremos de una tubería, se obtuvo la carga h , sustituyendo el valor h , la longitud del tubo y el diámetro en el programa se calculó los gastos que circulen a través de las tuberías. Figura 3.17.

Para calcular los gastos en las tuberías por medio del programa TUBO FLU, se siguió el procedimiento que se describe a continuación:

1- Inicio

Para empezar a utilizar el programa, presionar el botón **CASO 2**. Figura 3.13.



Figura 3.13 Presentación del programa Tubo Flu

2- Selección de la temperatura del agua

En el momento de introducir la temperatura del agua correspondiente a 20 °C se desplegaron las propiedades del agua, y se procedió a alimentar los datos requeridos para realizar el cálculo. Figura 3.14

Seleccionar la temperatura del agua y automáticamente se desplegarán sus propiedades

Llenar los espacios con los datos necesarios para realizar el cálculo

Algunas propiedades físicas del agua

Temperatura °C	Peso específico	Densidad ρ	Viscosidad $\mu \times 10^{-3}$	Viscosidad cinemática $\nu \times 10^{-6}$
0	1000.11	999.9	1.792	1.792

Valores más comunes de ϵ

MATERIAL	ϵ en mm
Vidrio, cobre, plástico, hule	0.0015
Hierro fundido nuevo	0.005 a 0.010
Hierro fundido semioxidado	0.010 a 0.015
Hierro fundido oxidado	0.015 a 0.030
Cemento liso	0.003 a 0.008
Acero	0.04 a 0.10
Asbesto cemento	0.025
Concreto	0.15 a 2 ó más

Regresar al menú principal

Regimen de Flujo:

Soluciones:

Q= m³/s

A= m²

V= m/s

μL = (Kg/(m²s))

Re=

Factor de fricción:

Figura 3.14 Base de datos del programa

2- Resolver

Una vez llenos los campos, se dió click en el botón **Resolver** y se obtuvieron los valores para el gasto, el área, la velocidad y el número de Reynolds. Figura 3.15.

Seleccionar la temperatura del agua y automáticamente se desplegarán sus propiedades

En este recuadro se observan los resultados del gasto, área, velocidad y número de Reynolds

The screenshot shows the 'TUBOFLU: Caso 2' software window. It features several input fields for physical properties of water, a 'Resolver' button, and a results section. The results section displays calculated values for flow rate (Q), area (A), velocity (V), dynamic viscosity (μ), and Reynolds number (Re). It also includes a table of common roughness values (ε) for various materials and a section for the friction factor (Factor de fricción) with the Colebrook-White formula selected and its value (0.038035) displayed.

MATERIAL	ε en mm
Vidrio, cobre, plástico, hule	0.0015
Hierro fundido nuevo	0.005 a 0.010
Hierro fundido semioxidado	0.010 a 0.015
Hierro fundido oxidado	0.015 a 0.030
Cemento liso	0.003 a 0.008
Acero	0.04 a 0.10
Asbesto cemento	0.025
Concreto	0.16 a 2 ó más

Aquí se indica el tipo de régimen que se presenta

En esta zona se observará el valor del factor de fricción calculado con la fórmula correspondiente al tipo de flujo en la tubería

Figura 3.15 Resultado final de cálculo de gastos en tuberías

3.10.4- Trayectoria del flujo en la red

Con los niveles piezométricos se observó que el flujo clorado entró en el nudo 9, (entrada E1), después se condujo una parte hacia la izquierda en el segmento que forman los nudos 9 al 2. Otra parte del mismo flujo se dirigió hacia la derecha, sección de los nudos 9 al 4, posteriormente, se bifurcó hacia a los nudos 8 y 6, del nudo 8 se desvió a la sección del nudo 7, ver la figura 3.16.

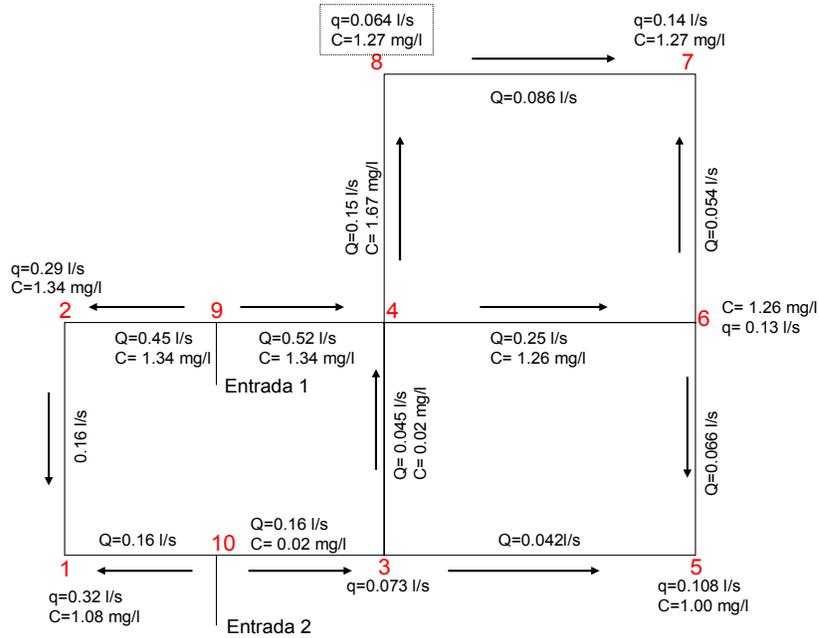


Figura 3.16 Trayectoria del flujo clorado en la Red de agua potable

3.10.5- Resultados

En la tabla 3.20, se observan los resultados obtenidos durante la prueba en la red de agua potable. Posteriormente, estos resultados fueron comprobados mediante la fórmula matemática desarrollada en este trabajo de investigación (Ecuaciones 3.4 y 3.6).

En la tabla 3.21 y la figura 3.17, se observa que los resultados experimentales y numéricos son muy parecidos. Eso permite validar dicha fórmula.

DIFUSIÓN DEL HIPOCLORITO DE SODIO EN UNA RED DE TUBERÍAS						
	Gasto (en L/s)	Concentración (en mg/L)	Nivel piezométrico 1 (en cm)	Nivel piezométrico 2 (en cm)	Nivel piezométrico 3 (en cm)	Nivel piezométrico 4 (en cm)
Nodo 1	0.32	1.08	24.67	28.35		
Nodo 2	0.29	1.34	60.4	26.3		
Nodo 3	0.073	0.02	28.35	21.5	11.5	
Nodo 4	0.16	1.67	23.55	20.95	61.15	15
Nodo 5	0.108	1.00	11.02	7.45		
Nodo 6	0.13	1.26	8.5	8.5	5.5	
Nodo 7	0.14	1.27	4.75	3.85		
Nodo 8	0.064	1.27	10.11	5.5		

Tabla 3.20 Resultados de las pruebas en la Red de tuberías

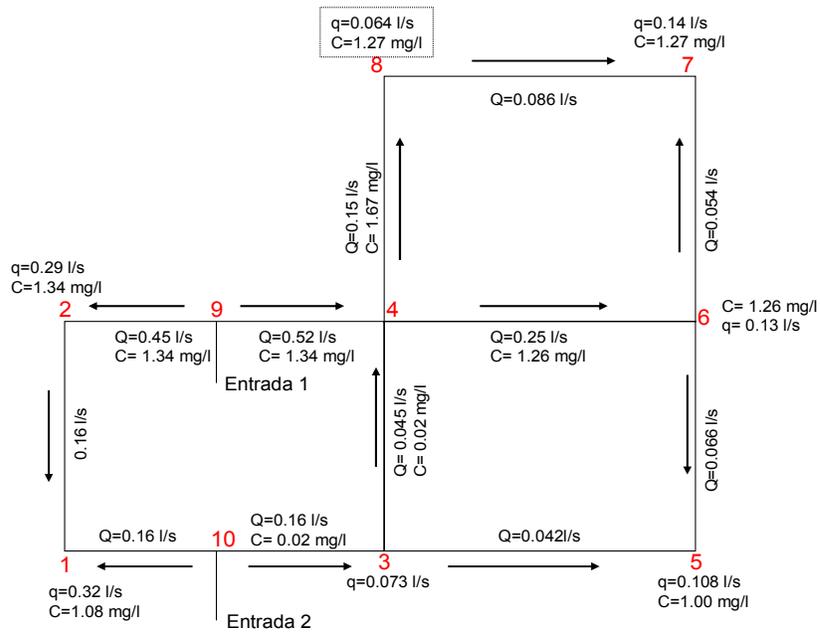


Figura 3.17 Aplicación de resultados de los cruces en la Red de agua potable

		Resultados experimentales				Resultados numéricos
Red de Tubería	Gastos (L/s)	Concentración (mg/L)	Flujo Másico (mg /s)	Suma de Masa (mg /s)	%Error	Concentración (mg/L)
Entrada 1	0.52	1.34	0.6968	0.6977		
Entrada 2	0.045	0.02	0.0009		0.0279	
Salida 1	0.25	1.34	0.335			
Salida 2	0.31	1.26	0.3906	0.7256		
						1.3954
						1.1253

Tabla 3.21 Resultados en cruces de tuberías dentro de la Red de agua potable

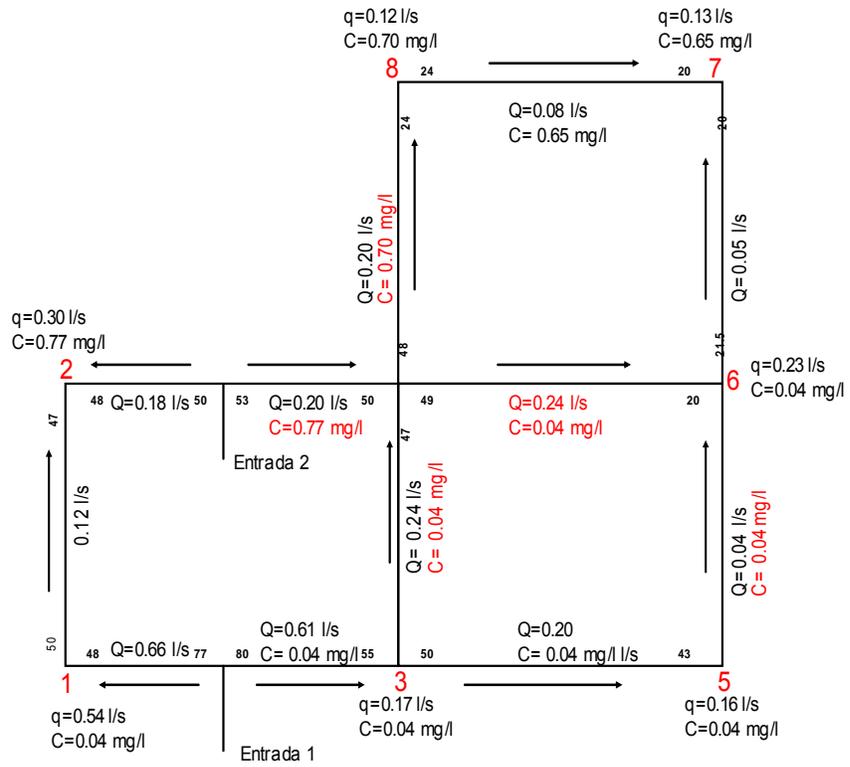


Figura 3.18 Última prueba en la Red de agua potable

Capítulo 4

Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Los ensayos realizados en las instalaciones del Instituto de Ingeniería (IIUNAM), permitieron comprobar la variación de la concentración del hipoclorito de sodio en el agua a lo largo de la red para varios escenarios, (figuras 3.17 y 3.18, tabla 3.20). En cuanto a los cruces de tuberías se pudo observar durante las pruebas, que además del calor, la luz, el contacto con ácidos y ciertos metales, la descomposición debida a la turbulencia es un factor importante, esto se corroboró cuando el gasto del flujo sin cloración es mayor que el gasto del flujo clorado, se notó que no hubo, mezcla y la pérdida era más grande; por el contrario cuando el gasto del flujo clorado es mayor sí se presenta la mezcla. En este caso se considera que la cantidad de masa de la sustancia que llega al cruce se distribuye de manera que la cantidad de movimiento de la sustancia sea igual en los tubos de salida. Se observó también que el hipoclorito de sodio utilizado como variable de respuesta demostró ser una sustancia susceptible de utilizarse en estudios posteriores, debido a su bajo costo, facilidad de medición, y utilizándose además como agente desinfectante.

4.2 Recomendaciones

Para verificar la bondad del modelo físico, es necesario dar seguimiento a este trabajo. A continuación, se hace unas recomendaciones que permitirán obtener mayor conocimiento sobre el fenómeno de difusión y encaminar los objetivos de estudios posteriores, ya que la difusión es de importancia en los estudios de abastecimiento de agua potable.

Con respecto a los cruces de tuberías, se recomienda lo siguiente:

- 1- Utilizar medidores de gasto más precisos para obtener mejor resultado y evitar errores en las mediciones cuando se utiliza el método de aforos volumétricos.
- 2- Tener una carga constante en los tanques, aunque es muy difícil obtener carga constante en el tanque que tiene cloro, pero en cuanto al tanque de agua sin clorar, es recomendable obtener una carga constante. Eso permitirá obtener un resultado más confiable en la medición de los gastos.
- 3- En cuanto a la degradación de la concentración del cloro, la cual depende de la relación que existe entre los gastos de entrada, se recomienda verificar esta relación cuidadosamente para poder establecer en mejor forma una fórmula matemática.

-
- 4- En cuanto a las concentraciones en las salidas es importante revisar la fórmula matemática desarrollada durante esta investigación a fin de reducir más error en su cálculo.

Referencias bibliográficas

- 1- Abastecimiento de agua potable y disposición y eliminación de excretas. Pedro López Alegría.
- 2- *Actualización de un método para calcular redes de tuberías funcionando a presión en régimen permanente*. Fuentes O., Sánchez J.L., (octubre-diciembre, 1991)
- 3- *Datos básicos*. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México, D.F. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, CNA, (1994).
- 4- *Datos básicos*, Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. México, D.F. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, CNA, (1999).
- 5- Diagnóstico para el Manejo Sustentable del Agua en la Cuenca Internacional del Río Hondo, México-Belice, al año 2025. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, CNA, (1994).
- 6- Difusión. Universidad tecnológica de Pereira (2003)
- 7- Emerging issues in Water and infections disease. OMS
- 8- Estadísticas del Agua en México, Edición 2007. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, CNA, (1994).
- 9- Estadísticas del Agua en México, Edición 2006. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, CNA, (1994).
- 10- Fugas en redes de distribución, SIHASA, dic 2003
- 11- *Funcionamiento hidráulico a presión en régimen no permanente de una red de tuberías*, Memorias de XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II, Cartagena, Colombia. Fuentes G., Fuentes O., (1992).
- 12- Gaceta de Administración del Agua. Volumen I, Número 1. (CNA, Diciembre 2007)
- 13- Guía de Traducción de Términos del Agua, Edición 2007 (CNA).
- 14- *Hidráulica de los canales abiertos*. Editorial Diana, México, D.F.
- 15- Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de

Tratamiento de Aguas Residuales en operación. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, CNA, (1994).

16- Manual of water supply practices. 6666 West Quincy Avenue, Denver, Colorado 80235, USA.

17- Método para determinar las concentraciones de una sustancia en una red de tuberías de agua potable. Óscar Fuentes Mariles, Cecilia Chávez, Javier Osnaya Romero.

18- Método de cálculo de redes de tuberías funcionando a presión con flujo permanente. (Sánchez y Fuentes, 1991)

19- Metodologías de Evaluación Socioeconómica para Proyectos de Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, CNA, (1994).

20- Metodologías de Evaluación Socioeconómica para Proyectos de Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento. (Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, CNA, (1995).

21- Mezcla de sustancias en cruces de tuberías. Carlos Cruickshank Villanueva y Cecilia Chávez Zavala.

22- Protection of the Human Environment , Water, Sanitation and Hearth. OMS, 2001

23- *Redes de distribución*. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, México, D.F. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, CNA, (1994).

24- Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, Gerencia de Normas Técnicas, CNA, (1994).

25- *Water Chlorination, Principals and Practices*. American Water Works Association, (1973).

PÁGINAS DE INTERNET

- 1- www.who.int/es/index.html
- 2- www.who.int/csr/don/es/index.html
- 3- www.cinu.org.mx/onu/estructura/organismos/oms.htm
- 4- es.wikipedia.org/wiki/OMS
- 5- www.omscosmetica.com.ar
- 6- www.omsdive.com
- 7- html.rincondelvago.com/fenomeno-de-difusion.html
- 8- es.wikipedia.org/wiki/Difusi3n_simple_a_trav3s_de_la_membrana_celular
- 9- es.wikipedia.org/wiki/Transporte_celular
- 10- www.tesisenxarxa.net/TESIS...//3_2_Difusion_Turbulenta