



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA



***“EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS
SEPARADORES CONVENCIONALES DE ACEITE PARA LOS
TALLERES Y SERVICIOS PARA AUTOS”***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA:
CARLOS MANUEL LÓPEZ VÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. CHEIKH FALL

ASESOR:
M. en C. DAURY GARCÍA PULIDO

TOLUCA, MÉXICO

NOVIEMBRE 2002

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente al Dr. Cheikh Fall por todo el apoyo y la dedicación que me ha brindado, contribuyendo fuertemente a mi formación como profesional y, sobretodo, como ser humano.

Gracias también al M. en C. Daury García Pulido por su asesoría para la construcción del separador piloto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que me otorgó para realizar mis estudios de Maestría y por haber soportado económicamente, en gran parte, el proyecto de investigación (CONACYT 28214 T, 1998) del cual se desprende mi tesis.

A la Universidad Autónoma del Estado de México, porque a través de su Coordinación General de Investigación y Estudios Avanzados, apoyó parcialmente la realización de esta tesis con el proyecto UAEM 1603/2002.

A todo el personal académico y administrativo del Centro Interamericano de Recursos del Agua (C. I. R. A.) por todas las facilidades prestadas tanto para realizar mi Maestría, como para llevar a cabo esta tesis profesional. ¡Mil gracias a todos!

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por la beca complementaria que me ha apoyado para concluir con mis estudios

A mis padres:

“Muchas gracias por estar siempre a mi lado,
este logro es solamente suyo”

A mi abuelo:

“Dondequiera que esté siempre lo recordaré con orgullo.
Usted es mi más fuerte motivación”

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis, se evaluó la eficiencia de varios separadores de grasas y aceites instalados en talleres de la Ciudad de Toluca. También se analizaron las características de las aguas residuales que producen estos establecimientos y las densidades de los aceites usados que manejan.

Con esos parámetros, se diseñó y construyó un separador piloto de grasas considerando parcialmente el criterio de diseño del American Petroleum Institute (A. P. I.).

El separador se analizó hidrodinámicamente y se evaluó su eficiencia de remoción de aceite aplicando un diseño factorial de Plackett-Burman de 16 corridas y 6 variables de 2 modalidades, con el cual se determinaron los parámetros operativos más significativos. La variable de respuesta para evaluar la hidrodinámica fue $\varepsilon=t_m/\theta$ (tiempo medio de residencia/tiempo de residencia hidráulico nominal), mientras que para el análisis de la eficiencia se empleó el porcentaje de remoción de aceite (E(%)).

Para generar un influente modelo suficientemente exigente y representativo, con el cual pudiera evaluarse la eficiencia del separador piloto, se analizaron dos sistemas de mezcla aceite/agua, uno conformado por mezcladores helicoidales alternados en línea y, otro, que marca la norma ASTM D 6104 modificado y adaptado a las condiciones de estudio.

Los resultados de los dos análisis (hidrodinámico y de remoción) se conjugaron para obtener una optimización básica del separador piloto. La optimización básica se combinó con un par de accesorios adicionales (una pantalla divisoria y un sistema de placas paralelas) y se realizaron 4 pruebas finales para determinar posibles aportaciones benéficas de estos dos elementos al diseño óptimo del separador.

El estudio reveló que algunos talleres que tienen separadores de grasas y aceites cumplen con la normatividad, a pesar del empleo de jabones y desengrasantes. Se pudo observar que existen otros talleres sin separadores de grasas y aceites que, según los análisis de susceptibilidad de separación, generan efluentes emulsificados.

Las aguas residuales de los talleres de lavado tienen concentraciones muy variables de grasas y aceites (de 186 a 1063 mg/L, con concentraciones muy emulsificadas de 61 a 417mg/L). Estas aguas tienen concentraciones de DQO sensiblemente elevadas que dificultan su posible reuso (533-897 mg/L) y concentraciones de SST de 600 a 700 mg/L. Las aguas residuales de los talleres de radiadores presentaron las siguientes

características: DQO 960–1300 mg/L, pH ácidos 5.3-6.8, conductividad 858-7000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y SST 260-2332 mg/L.

La evaluación hidrodinámica del separador piloto indicó que el vertedor de entrada, la longitud del separador y la mampara de retención son tres parámetros que explican hasta 90 % de la variabilidad en el tipo de flujo (ε) del separador piloto.

El sistema de mezcla modificado de la ASTM generó un influente modelo adecuado para evaluar la eficiencia del separador piloto (10 L/min, diámetro medio de partículas de aceite de 73 μm , con 69 % de ellas inferior a 150 μm y 39 % menor de 50 μm).

Los resultados de las pruebas batch realizadas con el influente reconstituido revelaron que no existieron diferencias significativas entre las eficiencias de remoción para las dos profundidades de análisis (40 y 55 cm).

Los factores que más influyeron en la eficiencia del separador piloto fueron el vertedor de entrada, la profundidad del separador y la penetración de la mampara de retención. Estos parámetros inciden hasta en 75% en la eficiencia del sistema. Además, se alcanzaron remociones superiores a las esperadas (de 82 % contra 39 % si se toma como base la fracción de gotas de aceite mayores de 150 μm).

Dentro de los rangos estudiados de tiempo de residencia hidráulico nominal (18-32 min) y de cargas hidráulicas superficiales (1.0-1.33 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ó, 24-32 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-d}$), no existió influencia alguna de estos dos parámetros sobre la eficiencia del separador piloto. Más bien, la eficiencia depende de la configuración específica del separador. Cuando se presentó un flujo con una $\varepsilon > 0.82$, se identificó una tendencia favorable en la eficiencia, mientras que por debajo de este valor no existe relación sistemática de aumento de la eficiencia cuando se incrementa el valor de ε .

Al conjugar los resultados de los dos análisis, se determinó que la configuración óptima básica del separador piloto es: vertedor de entrada rectangular, porcentaje de penetración de la mampara de 50 %, longitud del separador de 1.50 m, profundidad de 0.40 m, vertedor de salida con tubos y mampara de retención a 0.40 m del vertedor de salida. Esta configuración óptima básica presentó un buen comportamiento hidrodinámico ($\varepsilon = 0.86$) y una buena eficiencia ($E = 80.0$ %).

La utilización de una pantalla divisoria en el separador, con el objetivo de fragmentarlo en dos cámaras permitió mejorar aún más la eficiencia, incrementándola hasta 86.0 %, alcanzando la máxima capacidad posible del separador (de acuerdo con las pruebas de susceptibilidad de separación, el influente modelo reconstituido tiene 13 % de grasas y aceites que no pueden ser removidas mediante flotación libre).

CONTENIDO

Resumen.....	i
Indice de Figuras.....	vi
Indice de Tablas.....	ix

INTRODUCCIÓN..... 1

JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS	3
OBJETIVO GENERAL.....	5
OBJETIVOS PARTICULARES	5

1. ANTECEDENTES 7

1.1. ¿POR QUÉ EL SECTOR DE LOS TALLERES AUTOMOTRICES?	7
1.2. ACTIVIDADES CONTAMINANTES Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN.....	8
1.3. PRETRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	10
1.3.1. Separadores de grasas y aceites.....	10
1.3.2. Problemas de operación y límites de los separadores	17
1.4. DISTRIBUCIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA PARA REACTORES	21
1.4.1. Características generales	21
1.4.2. Tipos de reactores.....	21
1.4.3. La función de distribución del tiempo de residencia.....	23
1.4.4. Medición de la distribución del tiempo de residencia.....	23
1.4.5. Características de la distribución del tiempo de residencia	28
1.5. DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TIPO FACTORIAL.....	32
1.5.1. Introducción a la planificación de experimentos	32
1.5.2. Planes factoriales fraccionarios.....	32
1.5.3. Planes de Plackett y Burman	34
1.5.4. Análisis de datos de los planes de Plackett y Burman.....	34

2. METODOLOGÍA..... 39

2.1. TRABAJO DE CAMPO: VISITA A LOS TALLERES Y EVALUACIÓN DE LOS SEPARADORES EXISTENTES	39
2.1.1. Selección de los talleres.....	39
2.1.2. Recolección de muestras.....	40
2.1.3. Determinación de los caudales de operación de los talleres.....	42
2.1.4. Características base de las aguas.....	42

2.1.4.1. Características base de las aguas residuales.....	43
2.1.4.2. Características base de los aceites nuevos y usados	44
2.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEPARADOR PILOTO.....	45
2.3. EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DEL SEPARADOR	46
2.3.1. <i>Diseño experimental</i>	46
2.3.2. <i>Método de realización de las pruebas con trazador</i>	48
2.4. PRUEBAS PRELIMINARES A LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SEPARADOR.....	51
2.4.1. <i>Selección del aceite modelo y sistema de mezcla aceite/agua</i>	51
2.4.1.1. Selección del aceite modelo.....	51
2.4.1.2. Selección del sistema de mezcla aceite/agua	51
2.4.1.3. Determinación de la distribución del tamaño de partículas de aceite	55
2.5. EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL ACEITE	57
2.5.1. <i>Evaluación de la separación en columna batch</i>	57
2.5.2. <i>Evaluación de la eficiencia del separador piloto</i>	59
2.5.2.1. Diseño experimental	59
2.5.2.2. Procedimiento de realización de las corridas	60
2.5.3. <i>Optimización del separador piloto</i>	61
2.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS.....	64
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	66
3.1. TRABAJO DE CAMPO: VISITA A LOS TALLERES Y EVALUACIÓN DE LOS SEPARADORES EXISTENTES	66
3.1.1. <i>Descripción de los talleres visitados</i>	66
3.1.2. <i>Análisis de la eficiencia de operación de los separadores</i>	68
3.1.3. <i>Determinación de los caudales de operación de los talleres</i>	73
3.1.4. <i>Características base de las aguas</i>	78
3.1.4.1. Características base de las aguas residuales.....	78
3.1.4.2. Características base de los aceites nuevos y usados	81
3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEPARADOR PILOTO.....	84
3.3. EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DEL SEPARADOR PILOTO	89
3.4. PRUEBAS PRELIMINARES A LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SEPARADOR PILOTO	95
3.4.1. <i>Selección del aceite modelo</i>	95
3.4.2. <i>Selección del sistema de mezcla aceite/agua</i>	95
3.5. EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL ACEITE	100
3.5.1. <i>Evaluación de la separación en columna batch</i>	100
3.5.2. <i>Evaluación de la eficiencia del separador piloto</i>	107
3.5.3. <i>Optimización del separador piloto</i>	115
3.5.4. <i>Consideraciones generales para instalar el separador piloto en campo</i>	123

CONCLUSIONES.....	124
RECOMENDACIONES.....	126
BIBLIOGRAFÍA.....	128
ANEXOS.....	131
ANEXO A. DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE SEPARACIÓN.....	132
ANEXO B. DENSIDAD DE LOS ACEITES ANALIZADOS	134
B.1. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS ACEITES	134
B.2. DENSIDAD RELATIVA DE LOS ACEITES ANALIZADOS.....	137
ANEXO C. DOSIFICACIÓN DEL ACEITE.....	140
C.1. CALIBRACIÓN DE LAS BOMBAS DOSIFICADORAS.....	140
C.2. CÁLCULO DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO DE LAS GOTAS.....	141
ANEXO D. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA.....	144
ANEXO E. ANÁLISIS DE VARIANZA.....	155
E.1. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA.....	155
E.2. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA.....	157
ANEXO F. NORMAS.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Separador convencional empleado en la industria petrolera.....	14
Figura 1.2.	Separador con placas paralelas de flujo descendente.....	16
Figura 1.3.	Representación esquemática del funcionamiento de un separador de coalescencia.....	17
Figura 1.4.	Medición de las distribuciones de los tiempos de residencia.....	25
Figura 1.5.	Gráficas E(t) para diversos reactores.....	29
Figura 2.1.	Parámetros operativos del separador piloto.....	46
Figura 2.2.	Diagrama de operación del separador piloto para las pruebas con trazador.....	49
Figura 2.3.	Diagrama operativo del separador piloto para evaluar su eficiencia...	60
Figura 2.4.	Configuración óptima básica del separador piloto y accesorios adicionales.....	62
Figura 3.1.	Arreglo hidráulico encontrado en la mayoría de los talleres de Toluca: simples registros sanitarios.....	73
Figura 3.2.	El separador piloto de grasas y aceites, a) durante su construcción, b) terminado.....	84
Figura 3.3.	Vertedores de entrada y salida del separador piloto.....	86
Figura 3.4.	Sistema hidráulico del separador piloto.....	88
Figura 3.5.	Sistema de muestreo y de desalojo del separador.....	88
Figura 3.6.	Gráficas de la corrida No.1.....	89

Figura 3.7.	Resultados del análisis de varianza del plan estadístico para la evaluación hidrodinámica.....	91
Figura 3.8.	Diagrama de respuesta de la evaluación hidrodinámica.....	92
Figura 3.9.	Gráfica acumulada de la distribución del tamaño de partículas del sistema de mezcla seleccionado.....	98
Figura 3.10.	Gráfica Concentración vs Tiempo para la prueba batch número 1.....	100
Figura 3.11.	Gráfica Concentración vs Tiempo para la prueba batch número 2.....	101
Figura 3.12.	Gráfica Concentración vs Tiempo para la prueba batch número 3.....	101
Figura 3.13.	Grafica de Isorendimiento para la prueba batch 1.....	103
Figura 3.14.	Grafica de Isorendimiento para la prueba batch 3.....	103
Figura 3.15.	Gráfica Eficiencia vs Tiempo para la prueba batch número 1.....	104
Figura 3.16.	Gráfica Eficiencia vs Tiempo para la prueba batch número 3.....	104
Figura 3.17.	Gráfica Eficiencia vs Carga hidráulica superficial de la prueba batch número 1.....	106
Figura 3.18.	Gráfica Eficiencia vs Carga hidráulica superficial de la prueba batch número 3	106
Figura 3.19.	Resultados del análisis de varianza del plan estadístico para la evaluación de la eficiencia del separador piloto.....	109
Figura 3.20.	Diagrama de respuesta de la evaluación de la eficiencia del separador.....	110
Figura 3.21.	Fenómeno del “rodillo” de aceite observado con los vertedores rectangulares de entrada.....	112
Figura 3.22.	a) Gráfica Eficiencia vs Tiempo de retención hidráulico nominal, b) Gráfica Eficiencia vs Carga hidráulica superficial.....	113

Figura 3.23.	Gráfica ε vs Eficiencia del separador piloto.....	113
Figura 3.24.	Configuración óptima básica del separador y sus dos accesorios adicionales.....	116
Figura 3.25.	Diagrama de respuesta de las pruebas complementarias.....	119
Figura 3.26.	Interrelación entre las placas divisorias y las placas paralelas.....	120
Figura 3.27.	Representación gráfica del posible comportamiento de las gotas de aceite de la prueba final No.4.....	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	Fuentes principales de desechos en los talleres de reparación y mantenimiento de automóviles.....	9
Tabla 1.2.	Criterios típicos de diseño del separador con placas paralelas.....	16
Tabla 1.3.	Principales clases de reactores empleados en el tratamiento de aguas residuales.....	22
Tabla 1.4.	Matriz completa de P. B. de 16 corridas.....	37
Tabla 1.5.	Matriz reducida de P. B. de 16 corridas para 6 variables.....	37
Tabla 2.1.	VARIABLES OPERATIVAS ANALIZADAS.....	47
Tabla 2.2.	Configuración de las 16 pruebas del plan estadístico.....	47
Tabla 2.3.	Características operativas de las pruebas que se realizaron para seleccionar el sistema de mezcla aceite/agua.....	53
Tabla 2.4.	Parámetros operativos y características de las pruebas batch realizadas.....	57
Tabla 2.5.	Plan experimental final para optimizar el separador piloto.....	62
Tabla 3.1.	Descripción de los talleres evaluados.....	66
Tabla 3.2.	Evaluación de los separadores existentes en los talleres de la Ciudad de Toluca.....	69
Tabla 3.3.	Datos operativos y caudales de pistolas propulsoras.....	74
Tabla 3.4.	Volumen de agua requerido para lavar la carrocería de diversos vehículos.....	75
Tabla 3.5.	Volumen de agua requerido para el lavado y engrasado de diversos vehículos.....	76

Tabla 3.6.	Volumen de los tanques de prueba de los talleres de radiadores.....	77
Tabla 3.7.	Características base de las aguas residuales generadas por los talleres.	79
Tabla 3.8.	Resumen de las densidades relativas de distintos tipos de aceites nuevos y usados a 10, 15 y 40°C.....	82
Tabla 3.9.	Descripción de las corridas de la evaluación hidrodinámica y de sus valores de respuesta respectivos.....	90
Tabla 3.10.	Distribución de tamaño de las gotas de aceite con respecto a los sistemas de mezcla aceite/agua.....	96
Tabla 3.11.	Matriz experimental y respuestas de eficiencia del separador piloto.....	108
Tabla 3.12.	Resultados del análisis del tiempo de residencia y de la evaluación de la eficiencia del proceso de optimización del separador piloto.....	118

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Calidad, cantidad y uso eficiente, son los parámetros de la de la problemática del agua en México. Dentro de este contexto, se vuelve imperativo incrementar y optimizar la lucha contra la contaminación proveniente de las actividades que más dañan el medio ambiente.

En la Ciudad de Toluca, como en muchas otras comunidades del país, el crecimiento demográfico y la inmigración han generado una creciente demanda de viviendas, de servicios (energía eléctrica, transporte, agua potable, drenaje, etc.) y de un sinnúmero de elementos necesarios para asegurar que cada persona pueda vivir adecuadamente.

Independientemente de que la demanda de servicios pueda ser o no cubierta, hablar de cada uno de ellos involucra pensar en sectores de gran magnitud que tienen en su haber una infraestructura compleja que abarca y extiende su campo de acción a niveles diversos, como pueden ser los ámbitos económico, político, ecológico y social.

Analizando el servicio de transporte en la Ciudad de Toluca, una observación rápida de este sector indicaría que la demanda la satisfacen, principalmente, mediante el empleo de automóviles públicos, automóviles privados y autobuses. Estos medios de transporte requieren de servicios de mantenimiento periódicos y reparaciones para asegurar su funcionamiento y la prestación del servicio.

Las reparaciones y los servicios de mantenimiento que requieren los vehículos de Toluca se realizan en talleres mecánicos diferentes entre sí, dependiendo del tipo de atención requerida. De esta manera, se encuentran establecimientos especializados en partes mecánicas, eléctricas, electrónicas, lavado y engrasado, cambios de aceite y/o en reparación de radiadores, entre otras actividades.

Desafortunadamente, estos establecimientos generan una gran cantidad de residuos muy dañinos para el medio ambiente y, por consiguiente, para el ser humano, afectando severamente nuestro entorno y contaminando de manera indiscriminada aire, agua y suelo.

El problema se incrementa al observar que día tras día surgen cada vez más talleres de reparación y mantenimiento automotriz en función del crecimiento poblacional y del aumento del parque vehicular.

Las autoridades han manifestado su preocupación por la forma en la cual proliferan y operan estos establecimientos mediante la aplicación de normas ecológicas cada vez más rigurosas, buscando con ello reducir el impacto ambiental que producen los talleres automotrices. Sin embargo, es una tarea complicada porque la mayoría de ellos carecen por completo de medios de control de la contaminación, esto debido, entre otras cosas, a la falta de capacitación en materia ecológica de los usuarios, propietarios y operadores, a la carencia de recursos económicos y, en otras ocasiones, a que no existe una tecnología de control de la contaminación disponible y accesible para los talleres.

Con base en lo anterior, el C.I.R.A. propuso un proyecto de investigación financiado por CONACYT (clave 28214 T, 1998), en el cual se realizó la evaluación ambiental del sector de los talleres mecánicos y demás servicios de mantenimiento automotriz, sector comercial que goza de gran fama mundial por ser una fuente importante de residuos peligrosos y contaminantes que afectan agua y suelo.

El presente trabajo de tesis se encuentra dentro del proyecto mencionado previamente, y se enfoca en los separadores de grasas y aceites de los talleres, todo ello con la finalidad de ofrecer una tecnología accesible que contribuya a la implementación de eficientes medidas de control de la contaminación del agua.

Se considera que equipar los talleres con separadores de aceites, constituye una medida que podrá disminuir el impacto ambiental causado por este sector y facilitará el tratamiento de estas aguas en las plantas de tratamiento municipales con las que cuenta la Ciudad de Toluca.

El estudio sobre los separadores incluye una evaluación del comportamiento de las instalaciones existentes en los talleres, el análisis de los residuos aceitosos generados, así como la construcción y evaluación de un separador piloto de grasas y aceites para este tipo de establecimientos.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES.....	7
1.1. ¿POR QUÉ EL SECTOR DE LOS TALLERES AUTOMOTRICES?.....	7
1.2. ACTIVIDADES CONTAMINANTES Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN	8
1.3. PRETRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	10
1.3.1. Separadores de grasas y aceites.....	10
1.3.2. Problemas de operación y límites de los separadores	17
1.4. DISTRIBUCIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA PARA REACTORES	21
1.4.1. Características generales	21
1.4.2. Tipos de reactores	21
1.4.3. La función de distribución del tiempo de residencia.....	23
1.4.4. Medición de la distribución del tiempo de residencia	23
1.4.5. Características de la distribución del tiempo de residencia.....	28
1.5. DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TIPO FACTORIAL.....	32
1.5.1. Introducción a la planificación de experimentos	32
1.5.2. Planes factoriales fraccionarios.....	32
1.5.3. Planes de Plackett y Burman.....	34
1.5.4. Análisis de datos de los planes de Plackett y Burman	34

1. ANTECEDENTES

1.1. ¿POR QUÉ EL SECTOR DE LOS TALLERES AUTOMOTRICES?

La problemática ambiental causada por la utilización de los automóviles tiene ramificaciones que pueden expandirse a todos los medios: aire, agua y suelo. Estudios realizados en algunos países como Estados Unidos y Suiza, mostraron que el sector de servicio, reparación y mantenimiento de autos, contribuye enormemente a la descarga de aceites, grasas, metales, solventes y diversos compuestos orgánicos tóxicos en las aguas de alcantarillado y en las aguas superficiales (Paxeus, 1996; Duke y Chung, 1995). Este sector lo han clasificado en Estados Unidos, ubicándose entre los primeros niveles dentro de los pequeños generadores de residuos peligrosos.

En Suiza, el erradicar por completo las descargas al alcantarillado de aguas provenientes de los servicios de lavado para autos, ha sido un punto que han exigido los agricultores suizos como condición previa para poder utilizar los lodos de las plantas de tratamiento municipales como fertilizantes (Paxeus, 1996). Lo anterior constituye una buena representación de la imagen que tiene el sector de los talleres en el mundo y de la problemática ambiental relacionada con la industria del transporte.

Tomando en cuenta la vitalidad y la estructura de los servicios para autos en México (existe un gran número de talleres, en su mayoría informales), es evidente que el control de la contaminación en este sector debe tratarse con urgencia en todo el país.

Con la entrada en vigor del reglamento que rige el manejo de residuos peligrosos en México y la especial atención que se ha otorgado a los aceites usados, las autoridades han mostrado un interés hacia este sector que se incrementa día con día.

1.2. ACTIVIDADES CONTAMINANTES Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN

Los principales servicios de reparación y mantenimiento automotriz, pueden clasificarse de la siguiente manera de acuerdo con las actividades que realizan:

1. Reemplazo de fluidos de vehículos: aceites de motor y transmisión, líquidos para frenos, anticongelantes, principalmente.
2. Abastecimiento de gasolina y diesel.
3. Lavado y engrasado.
4. Reparación de carrocerías y pintura.
5. Desmontaje y venta de refacciones usadas.
6. Reemplazo de refacciones no reparables: balatas de frenos, baterías, llantas, mofles, componentes eléctricos, bombas de agua, etc. (servicios express).
7. Servicio de mecánica en general: desmontaje, limpieza y reparación de partes de motores y transmisión.
8. Servicio de mecánica especializada: reparación de carburadores, radiadores, entre otros.

Las actividades antes mencionadas se consideran entre las más grandes generadoras de contaminación dentro del sector de servicios para automóviles (WEF, 1995).

El lavado y engrasado, la limpieza del piso de talleres mecánicos y la reparación de radiadores están relativamente asociadas con las más fuertes descargas de aguas residuales al alcantarillado.

Las demás actividades pueden realizarse con poca o sin nada de agua; sin embargo, pueden considerarse como acciones críticas si se toman en cuenta los productos químicos que emplean y la naturaleza contaminante de los residuos que generan (aceites, polvo de metales, soluciones usadas de solventes, entre otros residuos líquidos).

Como resultado de todo lo anterior, los contaminantes que pueden encontrarse en el alcantarillado o en el suelo comprenden: aceites y grasas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos clorados, metales, ácidos, etilenglicol, detergentes y diversos componentes del petróleo.

La contaminación efectiva producida por las diferentes actividades depende de los métodos de trabajo que utilizan, de las medidas de prevención aplicadas, de la eficiencia con la cual se realiza la gestión de los residuos, de los tipos de productos químicos utilizados y de la inexistencia de procesos eficaces de pretratamiento.

En general, los talleres de servicio automotriz tienen la obligación de estar equipados con un separador de aceites, el cual debe operar con una eficiencia tal, que permita proteger la red de alcantarillado, los equipos de las plantas de tratamiento de aguas municipales y los cuerpos de agua superficiales contra diversos efectos nocivos, como pueden ser: la obstrucción de las tuberías de alcantarillado, el ataque en contra del concreto y de las coyunturas, perturbaciones en el funcionamiento de clarificadores, filtros, aireadores de superficie, etc. (Crites y Tchonobaglou, 2000).

A pesar de que el tratamiento con separadores se enfoca únicamente a aceites y grasas, no se debe perder de vista que los otros contaminantes son también preocupantes y deben atenderse, principalmente con la aplicación de medidas preventivas.

Las actividades de mayor impacto en la generación de residuos en los talleres son: la limpieza de las áreas de trabajo y almacenes, la limpieza de partes para su inspección o reparación, el cambio de fluidos (aceite, anticongelante, gasolina, etc.) y el remplazo de partes no reparables (batería, frenos, etc.). Una gran cantidad de los desechos que se generan (Tabla 1.1) son considerados como residuos peligrosos o bien, susceptibles de convertirse en ello dependiendo de las prácticas de gestión en el propio taller (Fall *et al.*, 1999).

Tabla 1.1. Fuentes principales de desechos en los talleres de reparación y mantenimiento de automóviles.

Limpieza de pisos y almacén	Limpieza de partes	Mantenimiento y reparación
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materiales obsoletos ▪ Fugas y derrames de líquidos y polvos ▪ Franelas y absorbentes sucios ▪ Lodos de separadores y trampas de sólidos ▪ Contenedores vacíos ▪ Residuos de limpieza de tanques 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Soluciones acuosas usadas en la limpieza (alcalinas o con surfactantes) ▪ Solventes usados en la limpieza ▪ Limpiadores usados de carburadores y frenos ▪ Fugas y derrames de solventes y líquidos alcalinos. ▪ Lodos y filtros de maquinas limpiadoras 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aceite de motor y filtros de aceite ▪ Aceite de transmisión, dirección y frenos ▪ Anticongelantes ▪ Residuos con asbesto de balatas de frenos y embrague ▪ Baterías (ácido y plomo) ▪ Radiadores usados (plomo) ▪ Convertidores catalíticos ▪ Residuos de pintura, diluyentes y filtros de gabinetes de pintura

1.3. PRETRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Prácticamente en todo el mundo, el pretratamiento de las aguas residuales que producen los talleres y los servicios para automóviles, se limita a la utilización de separadores de grasas y aceites. Esta práctica es también muy común en México, donde los separadores que se encuentran en los talleres de la Ciudad de Toluca son generalmente de tipo convencional (operan mediante la acción de la fuerza de gravedad).

Los separadores convencionales proceden de la industria del petróleo. Los criterios de diseño de este separador, antiguos por muchas décadas, los desarrolló el American Petroleum Institute, A. P. I., (A.P.I., 1990).

De esta manera, el diseño se basa en una hipótesis que considera un escurrimiento o flujo laminar, mientras que la velocidad de ascenso que experimentan las gotas de aceite la rige la Ley de Stokes. Debido a lo anterior, el cálculo se simplifica y únicamente se requiere determinar la carga hidráulica superficial (caudal entre superficie horizontal) requerida para el separador, en función de la velocidad de ascenso de las gotas de aceite que presentan un diámetro de 0.15 mm (según los criterios del A.P.I.). La velocidad de ascenso se determina por la diferencia de densidades que existe entre el agua y el aceite y por la viscosidad del agua residual (A.P.I., 1990).

1.3.1. Separadores de grasas y aceites

En forma amplia, existen principalmente tres tipos de separadores:

- a) El separador convencional, conformado básicamente por un canal rectangular.
- b) El separador con placas paralelas.
- c) El separador por coalescencia.

Por otro lado, existen otras tecnologías empleadas para separar aceites, como por ejemplo la flotación.

Históricamente, el diseño del separador de tipo convencional se basó en criterios desarrollados por el A. P. I. Desde entonces, se han instalado numerosos separadores, abarcando una gran variedad de aplicaciones dentro del tratamiento de las aguas residuales industriales, pudiendo encontrar este tipo de sistemas de pretratamiento en

refinerías de petróleo, fábricas productoras de aceites comestibles, aceites automotrices, entre otros sitios.

Los separadores de placas paralelas se basan en una tecnología más eficiente. Requieren menos espacio que uno convencional y son teóricamente capaces de conseguir concentraciones más bajas de aceite en el efluente; sin embargo, su operación y mantenimiento son más exigentes.

Por otra parte, los separadores por coalescencia conforman la última generación de separadores que ha arrojado la tecnología, presentando sistemas capaces de remover parte del aceite emulsificado presente en distintos líquidos y sustancias. Estos separadores tienen la desventaja de que su operación y mantenimiento requieren una mayor exigencia.

1.3.1.1. Separador de grasas y aceites convencional

Aplicación

Los separadores de aceite en agua convencionales se han diseñado para remover solamente aceite libre. Si el efluente a tratar contiene aceite emulsificado o disuelto, se requiere romper previamente dicha emulsión con un sistema de pretratamiento adicional.

Teoría básica

En esencia, un separador de aceite en agua de tipo convencional es una cámara diseñada para proveer a algún efluente de agua residual de las condiciones de flujo suficientemente inmóviles y estables, que permitan que las gotas de aceite libre asciendan a la superficie del agua y sean removidas.

La teoría de separación aceite-agua se basa en la velocidad de ascenso de las partículas de aceite (velocidad vertical) y en su relación con la carga hidráulica superficial del separador.

La velocidad con la cual las partículas de aceite se mueven hacia la superficie del separador es el resultado de la diferencia de densidades que existe entre el aceite y el agua residual.

La carga hidráulica superficial (CHS) es la relación que existe entre el caudal de operación del separador y su área superficial. En un separador ideal, cualquier partícula

de aceite con una velocidad de ascenso superior a la carga hidráulica superficial alcanzará la superficie y será removida.

En un separador ideal se asegura, lo máximo posible, la carencia de cortocircuitos, turbulencias y torbellinos; y la generación de un flujo laminar.

La carga hidráulica superficial requerida para remover un tamaño específico de gotas de aceite puede determinarse con la ecuación para la velocidad de ascenso. Dicha ecuación se obtiene a partir de la teoría general de la sedimentación (Ley de Newton):

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g}{C_D} \left[\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right] d} \quad (1.1)$$

Donde:

V_s	Velocidad ascendente de la partícula en estudio, cm/s.
C_D	Coefficiente de fricción, $C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34$, adimensional.
Re	Número de Reynolds, $Re = \frac{V_s d}{\nu}$, adimensional.
g	Aceleración debida a la fuerza de gravedad, 981 cm/s ² .

Cuando el valor del número de Reynolds es inferior a 1.0, se presentan las condiciones hidráulicas laminares que favorecen el proceso de flotación, de tal manera que la ecuación (1.1) adopta la forma siguiente, conocida como Ley de Stokes:

$$V_t = \left(\frac{g}{18\mu} \right) (\rho_w - \rho_o) D^2 \quad (1.2)$$

Donde:

V_t	Velocidad ascendente de la partícula de aceite, cm/s.
g	Aceleración debida a la fuerza de gravedad, 9.81 cm/s ² .
μ	Viscosidad absoluta del agua residual a la temperatura de diseño, poise (1 poise = $0.1 \frac{kg}{m \cdot s} = 0.1 \frac{N \cdot s}{m^2}$)
ρ_w	Densidad del agua a la temperatura de diseño, g/cm ³
ρ_o	Densidad del aceite presente en el agua residual a la temperatura de diseño, g/cm ³ .
D	Diámetro de diseño de las partículas de aceite, cm.

La velocidad ascendente de una partícula de aceite depende de la diferencia que existe entre su densidad y la del agua, de su diámetro, de la viscosidad del agua y de la temperatura.

Una vez fijada la temperatura y el tipo de aceite, la velocidad de ascenso depende únicamente del diámetro de las partículas. Las gotas pequeñas de aceite tienen una velocidad inferior a las de las partículas que tienen un tamaño mayor.

Con base en las investigaciones realizadas por el A.P.I. (A.P.I., 1990), se ha determinado que las partículas que presentan un diámetro mayor o igual a 0.015 cm (150 μm) se pueden remover eficientemente, en una cámara de separación sin placas, mediante la acción de la fuerza de gravedad.

Por lo que el principal criterio de diseño propuesto por el A.P.I. consiste en dotar al separador de una superficie tal, que la carga hidráulica superficial (CHS) sea igual a la velocidad de ascenso de las gotas de aceite de 150 μm . La ecuación de diseño está dada entonces por la expresión:

$$CHS = V_{t(150 \mu m)} \quad (1.3)$$

La ecuación (1.2) envuelve dos principios fundamentales que deben estar siempre en mente cuando se diseñe u opere un separador de grasas y aceites:

- a) El desempeño del separador depende directamente de la diferencia que existe entre las densidades relativas del agua y del aceite. Si la densidad del aceite es muy cercana a la del agua, las partículas tendrán una reducida velocidad de ascenso.
- b) Debido a que la velocidad ascendente de las partículas es inversamente proporcional a la viscosidad del agua residual, las partículas de aceite ascenderán más lentamente a temperaturas bajas.

En la Figura 1.1 es posible observar las características geométricas que presenta un separador convencional empleado en la industria petrolera. En ella se muestra la vista en planta de dicho separador y su vista lateral. Básicamente el separador consta de una longitud L , un ancho B para cada una de las cámaras y una profundidad del nivel del agua d .

El separador que se muestra en la Figura 1.1, presenta dos cámaras o canales de separación o funcionamiento, las cuales determinan su área horizontal superficial (A_H).

El hecho de que el separador de la Figura 1.1 esté dividido en dos cámaras, tiene que ver con la relación ancho/profundidad que se debe mantener para asegurar la generación de un flujo laminar. En la misma figura se visualizan también algunos parámetros operativos, como el gasto medio de operación (Q_M), la velocidad de ascenso de las partículas de aceite (V_t) y la velocidad horizontal de desplazamiento del fluido (V_H).

Los criterios de diseño del A.P.I. permiten calcular la superficie requerida a través de la ecuación 1.3, pero también establece algunas recomendaciones para elegir el ancho y la profundidad.

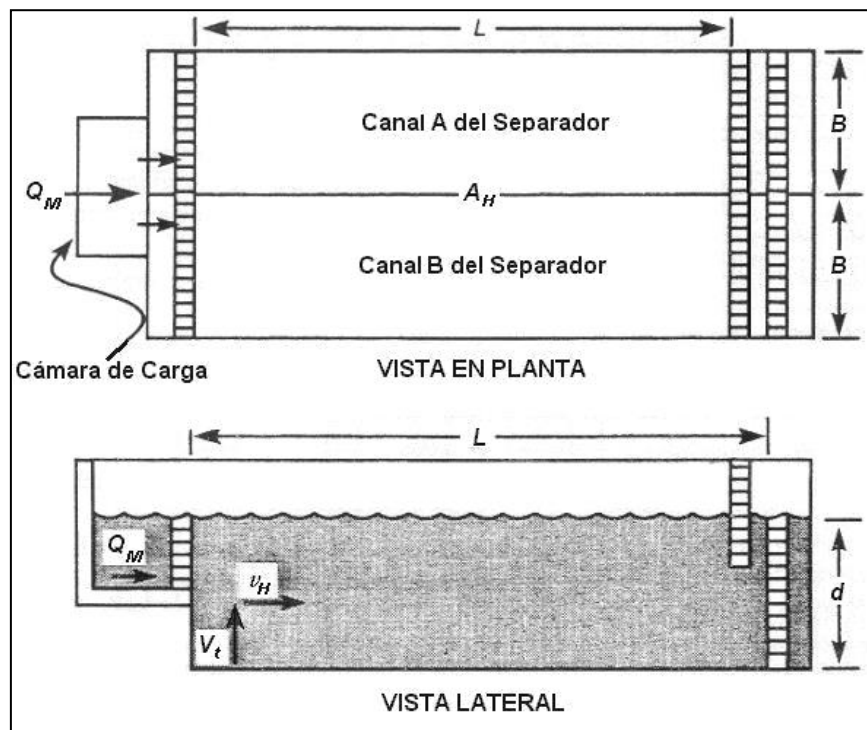


Fig. 1.1. Separador convencional empleado en la industria petrolera.

Es importante notar que los criterios del A.P.I. se han desarrollado únicamente para el caso de refinerías (caudales altos) y recomiendan en particular una profundidad mínima de 0.90 metros (A.P.I., 1990). Cuando se tienen que diseñar separadores pequeños, como los que se requieren en los talleres, es evidente que se necesitan modificar algunos de los criterios de diseño. Lo anterior justifica el trabajo experimental realizado para hallar un diseño aplicable al contexto de los talleres automotrices.

1.3.1.2. Separador con placas paralelas

Introducción

La eficiencia teórica de un separador de aceite en agua es inversamente proporcional a su carga hidráulica superficial. Cabe recordar que la carga hidráulica superficial es la relación que existe entre el caudal de operación del separador y su área superficial.

Con base en lo anterior, la eficiencia de un separador puede incrementarse mediante la instalación de placas paralelas (incremento de la superficie) en la cámara del separador.

Un separador con placas paralelas requiere menor espacio que un separador convencional para alcanzar una eficiencia similar. En la Figura 1.2 se presenta un ejemplo de un separador con placas paralelas.

De acuerdo con los proveedores, los requerimientos de espacio pueden reducirse, en algunas ocasiones, hasta la mitad del ancho y a la décima parte de su longitud cuando se emplea una unidad con placas paralelas en lugar de una convencional. Sin embargo, la experiencia adquirida por el uso de separadores de placas paralelas no es muy extensa, incluso su probable uso en los talleres es muy problemático, dado los problemas de mantenimiento que se han detectado (A.P.I., 1990).

Las placas utilizadas en las unidades con placas paralelas son usualmente corrugadas, lo que tiende a mejorar la recolección del aceite y del lodo que genera la materia presente en el agua residual.

Se ha observado que el aceite removido por los sistemas con placas paralelas tiene un menor contenido de agua que el que se elimina en los separadores convencionales, y la concentración de aceite de los efluentes tratados ha resultado ser hasta 60 % menor en este tipo de sistemas, los cuales pueden remover partículas menores de 0.15 mm.

Diseño de los separadores con placas paralelas

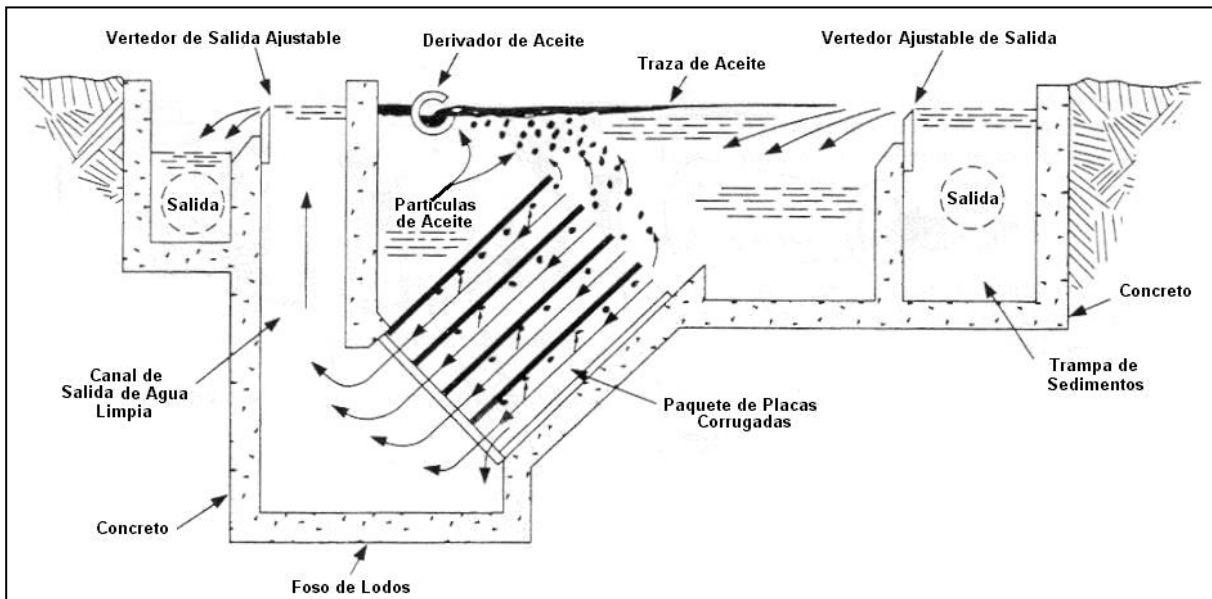
Los criterios típicos de diseño de los separadores con placas paralelas se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Criterios típicos de diseño del separador con placas paralelas.

Variable	Intervalo
Distancia perpendicular entre placas	1.9 -3.8 cm
Ángulo de inclinación de las placas Con respecto a la horizontal	45-60°
Tipo de aceite removido	Sólo aceite libre
Dirección del flujo del agua residual	Flujo transversal ó Flujo descendente

A diferencia de los separadores convencionales, y a pesar de conocer ciertos criterios de diseño, no existe un procedimiento establecido para diseñar los separadores con placas paralelas de una forma sistematizada y estandarizada.

La determinación del área superficial que se requiere para las placas se basa en los mismos fundamentos teóricos expuestos para el separador convencional. Para los demás aspectos de diseño, cada proveedor desarrolla sus propios criterios basándose en su experiencia y conocimiento del tipo de agua residual en estudio.

**Fig. 1.2.** Separador con placas paralelas de flujo descendente.

1.3.1.3. Separador por coalescencia

En este tipo de separador, la remoción de grasas y aceites ocurre como resultado de la adhesión que experimentan las partículas más pequeñas en la canasta de coalescencia y, mediante la flotación directa de las partículas de mayor tamaño. Durante el desarrollo de este tipo de separadores toda la atención de los diseñadores se enfocó al problema más complicado: hallar un medio capaz de atrapar las más diminutas gotas

(algunas emulsificadas), y favorecer su coalescencia para que formen gotas de mayor tamaño.

Los separadores por coalescencia pueden remover gotas de aceite de hasta 20 μm , manejando volúmenes desde 1 hasta 190 L/s. Los separadores por coalescencia se pueden construir con acero normal, acero inoxidable y fibra de vidrio.

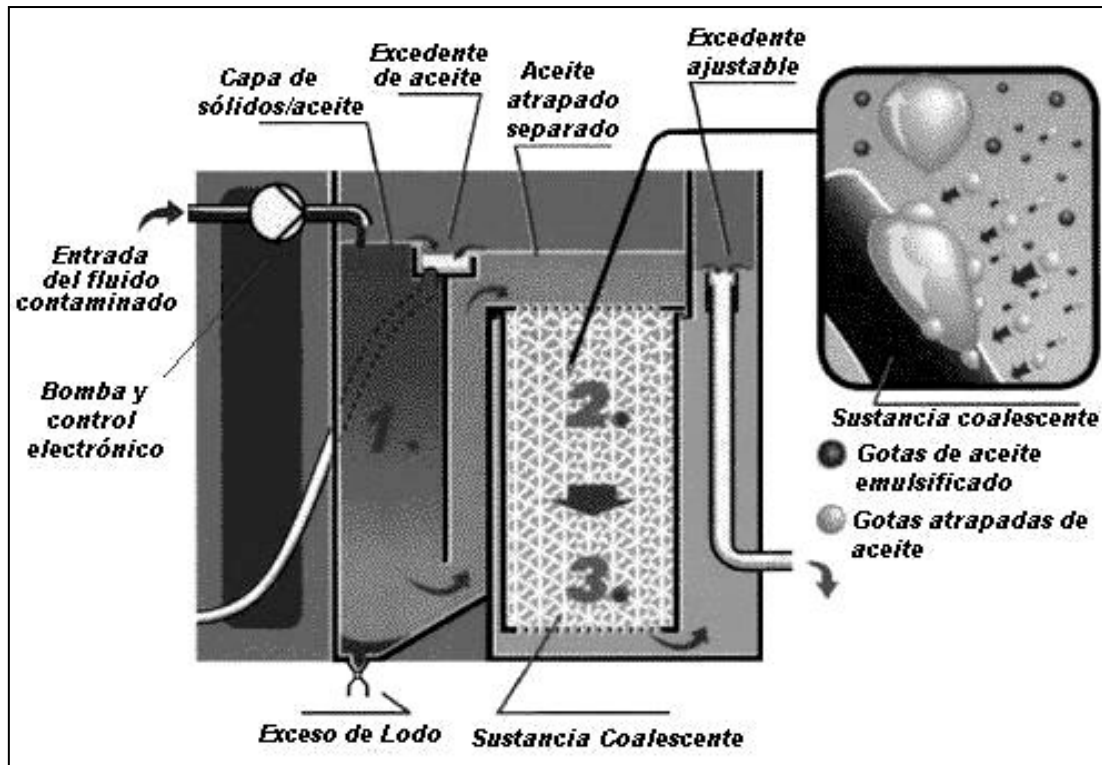


Fig. 1.3. Representación esquemática del funcionamiento de un separador de coalescencia.

1.3.2. Problemas de operación y límites de los separadores

Si los separadores realizaran adecuadamente su función, permitirían prevenir, de manera efectiva, la llegada de los aceites y grasas al alcantarillado. Desafortunadamente, se ha constatado, que la mayoría de los separadores instalados en los servicios para automóviles funcionan deficientemente, ya sea por un mal diseño, por falta de mantenimiento o por algunas razones relacionadas con las características de las aguas (WEF, 1995; Aldridge, 1997).

Una evaluación realizada por el A.P.I. a 32 separadores convencionales instalados en algunas refinerías, demostró que este tipo de separadores, aún cuando se han diseñado según los criterios convencionales (diámetro de partícula de 0.15 mm), en raras

ocasiones permiten alcanzar concentraciones residuales de grasas y aceites inferiores a 100 mg/L (A.P.I., 1990).

Por otro lado, con base en la NOM-002-ECOL-1996 (D.O.F., 1998), la concentración de grasas y aceites máxima permisible para los talleres automotrices y servicios similares en México es de 100 mg/L, como límite máximo instantáneo y, de 75 mg/L, como promedio diario máximo permisible. Además, sabiendo que muchos de los separadores instalados en la Ciudad de Toluca son de fabricación artesanal, se duda de su capacidad para cumplir con los objetivos que marca la normatividad vigente.

Por ello sería pertinente, en primer plano, evaluar la eficiencia de los separadores existentes y, en segundo término, pensar en mejorar su diseño, empezando por una evaluación precisa de las propiedades físicas de los aceites a separar (densidad y distribución de tamaño de las gotas de aceite), en lugar de aceptar y emplear los valores utilizados en el diseño de los separadores que se instalan en las refinerías.

El A.P.I. no ha sido el único que ha corroborado las limitaciones que presenta el método de diseño convencional de los separadores de aceites que trabajan por gravedad.

Hafskjold *et al.* (1994) subrayan la incapacidad del método de diseño clásico para asegurar y prever la calidad del agua tratada que se puede obtener en función de los parámetros operacionales. Algunos autores han iniciado trabajos en este sentido, basándose en el hecho de que el mejoramiento de la concepción, y la posibilidad de prever con mayor precisión la eficacia de los separadores, son objetivos que se pueden alcanzar si se toma más en cuenta la hidrodinámica (Langerman *et al.*, 1996).

Efectivamente, la evaluación del régimen de escurrimiento, junto con la obtención de la distribución de los tiempos de residencia, permiten detectar los problemas de cortocircuitos, retromezclado, volumen muerto y desviación de un escurrimiento laminar (Fogler, 1986).

Con base en lo anterior, la realización de pruebas con trazador al flujo del separador piloto flexible que se construyó en el presente trabajo, podría arrojar datos hidrodinámicos muy importantes que servirían para definir adecuadamente los mejores sistemas de entrada y salida (vertedores o tuberías de acceso), y la profundidad y la longitud más favorables que minimicen las zonas muertas y los cortocircuitos, obteniendo un flujo pistón ideal que contribuya a la generación de una mayor velocidad de ascenso de las gotas de aceite y, por consiguiente, a su eliminación.

Por otro lado, Hafskjold *et al.* (1994) demostraron que la coalescencia puede jugar un papel importante, no previsto dentro del método de diseño clásico. El diseño podría ser más exacto si se basara el diseño en el tiempo de residencia (que toma en cuenta la acción de la coalescencia) y no en la carga superficial como han sugerido los criterios actuales. El sistema estudiado por estos autores consistió en un separador que estaba destinado a extraer el agua contenida en una fuente de petróleo, en la cual el petróleo contenía de 10 a 20 % de agua.

La metodología experimental y la modelación matemática utilizada por estos autores sin duda son innovadoras, y sus aplicaciones a los sistemas de tipo aceite en agua abren un camino para mejorar el diseño de los separadores por gravedad en el tratamiento de aguas residuales.

Hafskjold *et al.* (1994) han utilizado pruebas en columna batch para obtener los perfiles de concentración en función del tiempo y de la profundidad, así como para relacionar la calidad del efluente tratado de un separador que opera en forma continua con sus parámetros operativos.

Aparte del diseño, es necesario mencionar otro problema particular asociado a la utilización de los separadores de aceite, ya que en el caso de los servicios de lavados para autos, la utilización masiva de detergentes en este sector favorece la formación de emulsiones de aceites en las aguas residuales, lo cual afecta enormemente el comportamiento de los separadores, ya que se sabe que los separadores que actúan mediante gravedad, no pueden tratar las fracciones de aceite en emulsión o solubles (Alther, 1997; WEF, 1995).

Por lo anterior, aún si no se contempla estudiar el rompimiento de las emulsiones dentro del presente trabajo, cabrá la posibilidad de que el separador diseñado en esta investigación necesite un pretratamiento suplementario antes de que pueda funcionar adecuadamente en algunos tipos de servicios para autos. El problema de la emulsión es un problema independiente del diseño que habrá que atender separadamente, según las necesidades que se presenten.

Algunos estudios realizados en Suiza demostraron de que la eficiencia de un separador convencional que se colocó en un servicio de lavado fue nula (Paxeus, 1996).

Además de todo lo anterior, el lavado de autos se considera como uno de los principales generadores (en volumen) de aguas residuales en este sector (WEF, 1995).

Se debe notar que las aguas residuales de lavados para autos, pueden contener una gran variedad de contaminantes (metales, clorobencenos, surfactantes, aceite), con una alta demanda química de oxígeno, que se ubica dentro del rango o nivel establecido para efluentes provenientes de la industria petroquímica (DQO de 120 a 1200 mg/L y concentraciones de aceite entre 10 y 1750 mg/L), (Paxeus, 1996).

Si es imperante mantener el uso de separadores de aceite en los servicios de lavado, podría ser necesario introducir un tratamiento para romper las emulsiones. Este proceso se realiza de manera adecuada en muchos sectores industriales (Alther, 1997). Sin embargo, se requieren evaluar los agentes más comúnmente empleados (H_2SO_4 , $Al_2(SO_4)_3$, $FeCl_3$ y polímeros catiónicos), para determinar la factibilidad de este tipo de tratamiento en el sector en estudio. Esta parte de la problemática no se incluye en la presente investigación.

1.4. DISTRIBUCIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA PARA REACTORES

1.4.1. Características generales

Todos los procesos de tratamiento químicos y biológicos de aguas residuales se llevan a cabo dentro de un volumen definido por límites específicos. El contenedor que provee ese volumen y sus accesorios se conoce como reactor químico o reactor biológico (bioreactor), dependiendo del método de tratamiento utilizado.

Dentro del reactor se producen una gran cantidad de variaciones (tanto en la composición como en la concentración de los distintos materiales) que constituyen la esencia del proceso. Las variaciones las causan el transporte hidráulico de materia y las reacciones o transformaciones que se generan en el interior del reactor.

Los reactores que se utilizan para el tratamiento de aguas residuales (el reactor batch de mezcla completa, el reactor con flujo pistón y los reactores de mezcla perfecta continua, principalmente) se han modelado como reactores ideales. Desafortunadamente, en el mundo real es muy común observar que el comportamiento de estos elementos difiere enormemente del desempeño teórico ideal con el cual se diseñaron. El separador convencional de aceite, en particular, se diseña como si se tratara de un reactor con una hidrodinámica similar a la de un flujo pistón. Al desviarse de este tipo de flujo, se falsean todas las bases en la que se fundamenta el diseño. Por lo que es importante diagnosticar el tipo de flujo y seleccionar una configuración que acerque el flujo del separador al flujo laminar. Para esto se realizan las pruebas con trazador.

En general, son muy pocas las ideas básicas o conceptos usados para caracterizar y modelar el comportamiento de los reactores no ideales.

Tres conceptos son los que básicamente se emplean para describir el desempeño de los reactores no ideales: su distribución del tiempo de residencia, la calidad de su mezcla y el modelo que se usa para describirlo (Fogler, 1986).

1.4.2. Tipos de reactores

En el tratamiento de aguas residuales se emplean principalmente tres tipos de reactores, los cuales presentan distintas características hidráulicas y cada uno de ellos tiene distintas aplicaciones en función de los objetivos y las metas planteadas. Las

principales clases de reactores actualmente empleados son (Crites y Tchobanoglous, 2000):




- a) reactor *batch*, conocido también como reactor de flujo intermitente o de “cochada”
- b) reactor con flujo pistón, también llamado reactor de flujo tubular
- c) reactor de mezcla completa o reactor de tanque agitado con flujo continuo

a) Reactor batch: En este tipo de reactores, no existe flujo alguno de entrada o de salida del reactor. El líquido está completamente mezclado. Consta básicamente de un tanque de reacción, una tubería de alimentación con la cual se llena el tanque del reactor antes de iniciar el proceso de tratamiento, una tubería para desalojar el agua tratada al final del proceso y, en la mayoría de los casos, de un mezclador mecánico que agita uniformemente el agua a tratar.

b) Reactor con flujo pistón: En este reactor, el agua pasa a través del tanque y sale siguiendo la misma secuencia con que ingresa sin presentar mezcla longitudinal alguna, sólo distribuyéndose uniformemente en sentido transversal. Las partículas mantienen su identidad y permanecen en el interior del tanque un tiempo similar al tiempo de retención teórico. Este tipo de flujo puede aproximarse al que se produce en un tanque de gran longitud con una relación longitud/ancho elevada, en el cual la dispersión longitudinal es mínima o nula.

c) Reactor con mezcla completa: La mezcla completa se produce cuando el agua que entra al tanque se dispersa inmediatamente. Generalmente se emplean reactores con geometría circular y *baffles* (mamparas o pantallas) para favorecer la mezcla completa; sin embargo, los reactores con forma cuadrada también pueden utilizarse eficientemente si las aguas tratadas se distribuyen en forma uniforme y continua.

Tabla 1.3. Principales clases de reactores empleados en el tratamiento de aguas residuales (adaptada de Crites y Tchobanoglous, 2000)

Tipo de reactor	Esquema de identificación
Batch	
Con flujo pistón	
Mezcla completa	

1.4.3. La función de distribución del tiempo de residencia

La idea de utilizar la distribución del tiempo de residencia para analizar el desempeño de los reactores fue propuesta en los años treinta (Fogler, 1986). Sin embargo, el concepto no se usó ampliamente sino hasta los años cincuenta, cuando investigadores de esos años organizaron los conceptos y definieron las distribuciones de interés.

En un reactor con flujo pistón ideal, todas las moléculas del material que abandonan el sistema permanecen dentro de éste exactamente la misma cantidad de tiempo. De manera similar, en un reactor batch, todas las moléculas del material reactivo han permanecido en su interior el mismo intervalo de tiempo. El tiempo que las moléculas del material pasan dentro de los reactores se conoce como tiempo de residencia hidrodinámico.

El reactor con flujo pistón ideal y los reactores batch son las dos únicas clases de reactores en que todos los elementos de los fluidos que ingresan en su interior tienen el mismo tiempo de residencia. En todos los demás tipos de reactores, cada átomo que entra por el sistema de alimentación permanece una cantidad de tiempo diferente, presentándose una distribución del tiempo de residencia del material dentro del sistema. Éste es el caso del reactor tubular real y del reactor de mezcla completa.

En cualquier tipo de reactor, la distribución de su tiempo de residencia puede afectar significativamente su desempeño.

La distribución del tiempo de residencia (DTR) de un reactor es una característica que nos brinda una idea aproximada del tipo de mezcla que se genera en su interior. Por ejemplo, un reactor con flujo pistón ideal, no presenta mezcla axial alguna, lo cual se ve reflejado en su DTR. Por otra parte, el reactor con mezcla completa posee un tipo de DTR muy diferente al del reactor con flujo pistón. Sin embargo, no todas las DTR son únicas de un tipo de reactor en particular, pudiéndose presentar casos de reactores marcadamente diferentes que despliegan idénticas DTR. No hay que olvidar que la DTR que exhibe un reactor dado establece huellas muy distintivas del tipo de mezcla que ocurre dentro de él y es una de sus características más informativas.

1.4.4. Medición de la distribución del tiempo de residencia

La distribución del tiempo de residencia se determina experimentalmente mediante la inyección de un químico inerte, llamado trazador, al influente del reactor en estudio a un tiempo $t = 0$. Posteriormente, se mide la concentración del trazador inyectado C en

el efluente del sistema a intervalos regulares de tiempo, determinando así, la concentración del trazador C en función del tiempo.

El trazador debe ser una sustancia no reactiva y fácilmente detectable, además de tener propiedades físicas muy similares a las de la mezcla que se produce en el interior del reactor y ser completamente soluble en ella.

El material que se emplea como trazador no lo deben absorber las paredes u otras superficies del reactor. Estos últimos requerimientos son necesarios para que el comportamiento del trazador refleje fielmente el comportamiento del agua. Materiales radioactivos, colorantes y sustancias salinas (NaCl) son algunos de los tipos más comunes de trazadores (Fall, 2000). Los dos métodos de inyección de trazador más frecuentes son la entrada de pulso y la entrada de escalón (Fig. 1.4).

1.4.4.1. Método del pulso

En el método del pulso, una cantidad de trazador N_0 se inyecta súbitamente en un único movimiento al influente del reactor en el tiempo más corto posible. La concentración en la salida se mide en función del tiempo. Las curvas de concentración típicas en la entrada y en la salida se muestran en la Figura 1.4. Los datos primarios que se recaban para los análisis posteriores de la distribución del tiempo de residencia (DTR), corresponden a los datos de la curva Concentración vs Tiempo en el efluente. La cantidad de trazador ΔN que abandona el reactor entre el tiempo t y $t+\Delta t$ es entonces (Fogler, 1986):

$$\Delta N = vC(t)\Delta t \quad (1.4)$$

donde v es el caudal con el cual opera el reactor. En otras palabras, ΔN es la cantidad de material que ha permanecido una cantidad de tiempo comprendido entre t y $t+\Delta t$ dentro del reactor. Dividiendo a la expresión anterior por la cantidad total de material N_0 que fue inyectada al reactor, se obtiene:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{vC(t)\Delta t}{N_0} \quad (1.5)$$

La ecuación anterior representa la fracción de material que experimenta un tiempo de residencia comprendido entre t y $t+\Delta t$.

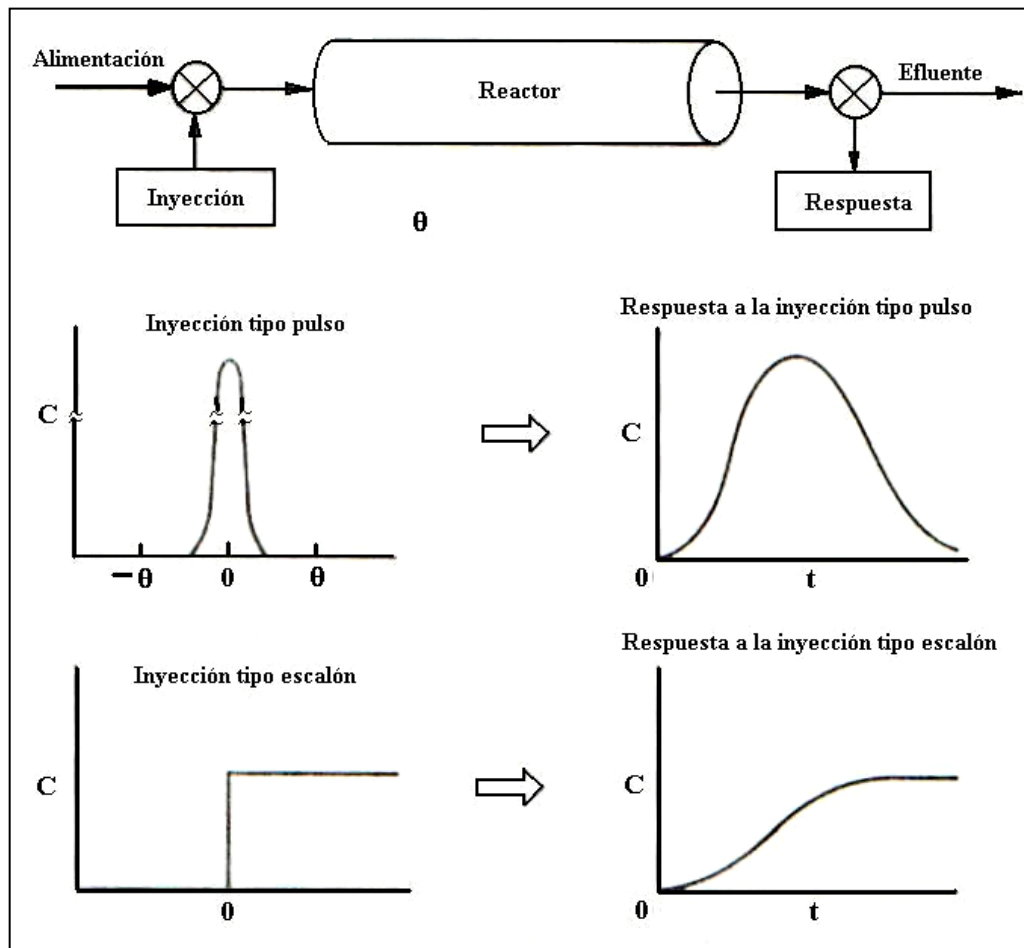


Fig. 1.4. Medición de las distribuciones de los tiempos de residencia.
(Adaptado de Flogler, 1986)

Para una inyección tipo pulso definimos:

$$E(t) = \frac{vC(t)}{N_0} \quad (1.6)$$

así que,

$$\frac{\Delta N}{N_0} = E(t)\Delta t \quad (1.7)$$

La expresión $E(t)$ se conoce como la función de distribución del tiempo de residencia. Es la función que describe en forma cuantitativa, cuánto tiempo permanecen las moléculas de los diferentes fluidos en el interior del reactor.

Si N_0 no es conocido directamente, se puede obtener por integración a partir de las mediciones de la concentración en la salida. Escribiendo la ecuación (1.4) en forma diferencial:

$$dN = vC(t)dt \quad (1.8)$$

Integrando, se tiene:

$$N_0 = \int_0^{\infty} vC(t)dt \quad (1.9)$$

El gasto v es usualmente constante, por lo que substituyendo la expresión (1.9) en la ecuación (1.6) y realizando las simplificaciones pertinentes se llega a la ecuación:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (1.10)$$

La integral en el denominador es el área bajo la curva $C(t)$.

Una manera alternativa de interpretar la función de distribución del tiempo de residencia es en forma integral, definiendo $F(t)$ como:

$$F(t) = \int_{t_1}^{t_2} E(t)dt \quad (1.11)$$

$F(t)$ representa matemáticamente, la fracción de trazador que abandona el reactor después de haber permanecido dentro de éste, un periodo de tiempo comprendido entre t_1 y t_2 .

Como es posible saber, la totalidad del trazador se evacuará durante todo el tiempo de duración de la prueba, es decir, la fracción del material que ha residido en el interior del reactor durante un tiempo t comprendido desde $t=0$ (inicio de la prueba) hasta $t=\infty$ (final de la prueba) es 1; por lo que:

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \quad (1.12)$$

Las principales limitaciones con la técnica del pulso radican en la dificultad de generar una inyección de pulso adecuada en la entrada del reactor. Además, la dispersión que presente debe ser insignificante entre el punto de inyección y la entrada del reactor. Si estas condiciones pueden obtenerse, esta técnica es una manera práctica, directa y simple para calcular la DTR.

Existen problemas, como suele suceder, cuando la curva Concentración vs Tiempo tiene una “cola” muy larga, por lo que el análisis puede estar sujeto a grandes imprecisiones. Esto último debido a la dificultad matemática que implica el poder calcular adecuadamente el área bajo la curva $C(t)$. Para facilitar la integración, la “cola” de la curva puede modelarse, en algunas ocasiones, aproximando la caída de la curva con una función exponencial.

1.4.4.2. Método del escalón

El método del escalón puede realizarse de dos maneras diferentes en cuanto a procedimiento, pero muy similares en esencia y análisis. De esta manera, se puede hablar del método del escalón positivo y del método del escalón negativo. Aquí sólo se muestra el método del escalón positivo, porque es el que se empleó para analizar la hidrodinámica del separador piloto (Fogler, 1986).

Para llevar a cabo este método, es necesario agregar una cantidad continua de trazador a la alimentación del sistema a partir del tiempo $t=0$. Considerando que antes de este tiempo no se había agregado cantidad alguna. Simbólicamente tenemos:

$$\begin{array}{ll} C(t) = 0 & t \leq 0 \\ 0 < C(t) < \text{constante} & 0 < t < \infty \\ C(t) = \text{constante} & t \approx \infty \end{array}$$

Una vez que ha iniciado la adición de trazador al sistema, la concentración con la cual inició la inyección debe mantenerse a este nivel hasta que la concentración medida en el efluente del reactor sea muy similar al de la inyección, con lo cual la prueba habrá finalizado. Una curva típica de concentración en la salida para esta clase de pruebas se muestra en la Figura 1.4.

A un tiempo t dado, obviamente después del inicio del experimento, el trazador que evacua el reactor ha residido en el interior de éste “ t ” segundos o menos. Esto significa que la cantidad $[C(t)/C_0]$ es la fracción de trazador que ha permanecido dentro del reactor un tiempo similar al tiempo “ t ”. Si el trazador se comporta de manera muy similar al resto del material que se encuentra dentro del sistema (agua), la relación $[C(t)/C_0]_{\text{ESCALÓN}(+)}$ es además, la fracción del flujo de salida que ha

permanecido un periodo de tiempo inferior al tiempo “ t ” en el interior del reactor. Matemáticamente, tenemos:

$$\left[\frac{C(t)}{C_0} \right]_{\text{ESCALÓN (+)}} = \int_0^t E(t) dt \quad (1.13)$$

Diferenciando la expresión anterior para obtener la función de distribución del tiempo de residencia, se obtiene:

$$E(t) = \frac{d}{dt} \left[\frac{C(t)}{C_0} \right]_{\text{ESCALÓN (+)}} \quad (1.14)$$

El método del escalón es experimentalmente más sencillo que la prueba del método del pulso. Además, tiene la ventaja adicional de que la cantidad total de trazador inyectada en la alimentación durante la realización de la prueba, no tiene por qué conocerse, a diferencia del método del pulso.

Entre los posibles problemas que presenta la técnica del método del escalón se encuentra la dificultad de mantener una concentración constante de trazador en la alimentación.

Obtener la distribución del tiempo de residencia de la prueba envuelve, además, la dificultad de llevar a cabo la diferenciación de los datos recolectados, lo que representa probablemente el más serio contratiempo para la técnica, ya que la diferenciación de los datos experimentales puede, en ocasiones, generar errores importantes.

Un tercer problema puede ser la gran cantidad de trazador requerida para realizar la prueba, ya que si el trazador es costoso, podría ser preferible optar por el método del pulso.

1.4.5. Características de la distribución del tiempo de residencia

La Figura 1.5 ilustra varios ejemplos de distribuciones típicas del tiempo de residencia para diferentes reactores. El primer pico que presenta la figura 1.5d corresponde a un ligero corto circuito del fluido. En la gráfica 1.5c, se observa que la mayor parte del fluido sale antes del tiempo de residencia nominal ($\theta = V/Q$), la causa de este fenómeno puede ser la generación de una zona muerta dentro del reactor, es decir, la existencia de una zona en la cual el fluido pareciera estar estancado. La zona

muerta reduce el volumen efectivo del reactor, por lo que su volumen es menor de lo esperado.

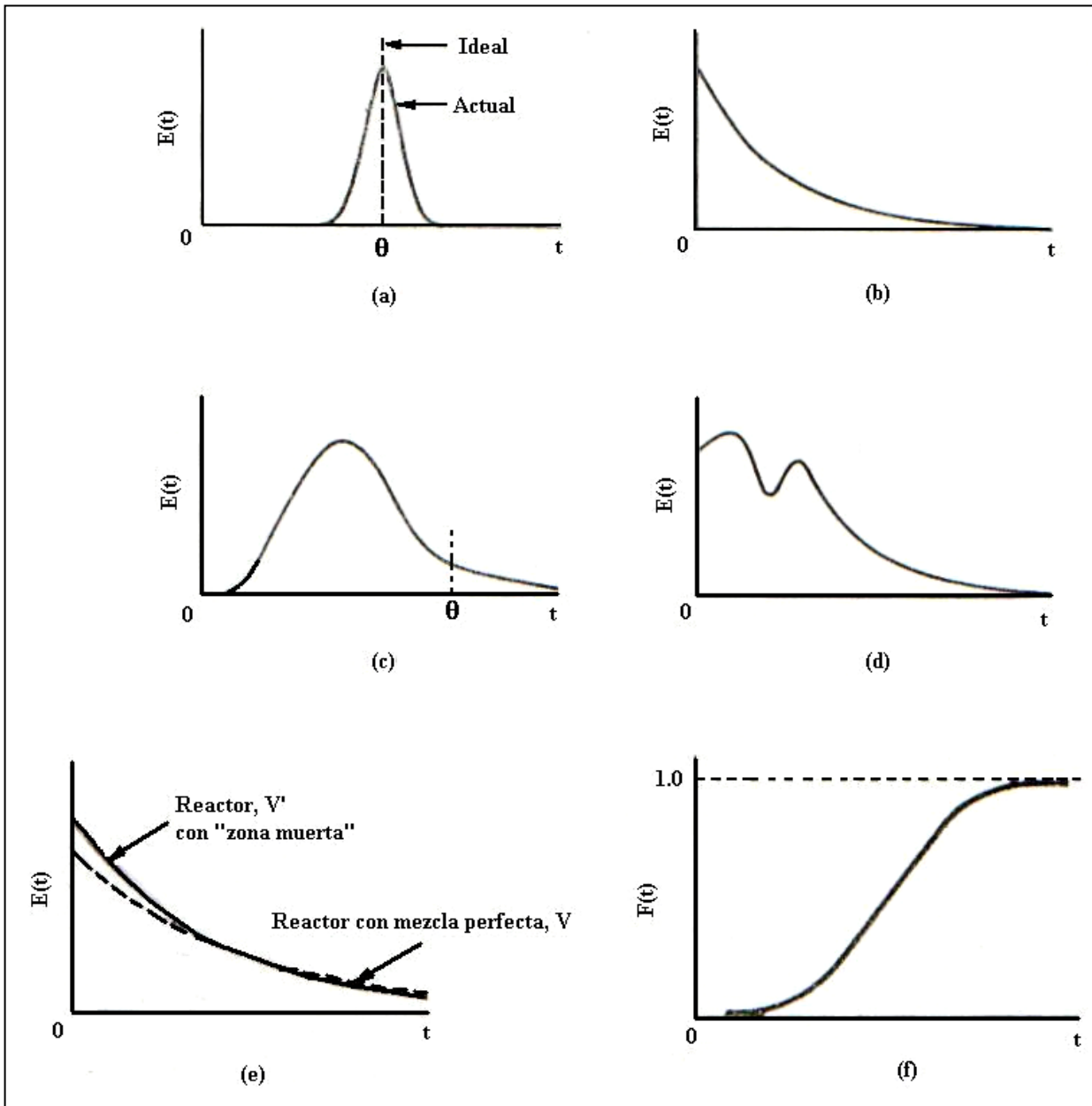


Fig. 1.5. Gráficas $E(t)$ para diversos reactores;
 (a) reactor con flujo pistón; (b) reactor con flujo continuo con mezcla perfecta;
 (c) reactor tubular con zona muerta; (d) reactor con cortos circuitos;
 (e) reactor con flujo continuo con zona muerta; (f) función de distribución acumulada.
 (Adptado de Fogler, 1986).

1.4.5.1. Tiempo medio de residencia

Un parámetro que frecuentemente se usa al hablar de reactores ideales es el tiempo de residencia nominal θ , definido como el cociente del volumen del reactor y su caudal de funcionamiento (V/Q). Si el funcionamiento de un reactor de tipo tubular fuera ideal, cada fragmento del material que se encuentra en su interior tendría un tiempo de residencia idéntico al tiempo de residencia nominal θ . Sin embargo, en pocas ocasiones los reactores operan bajo un esquema ideal. Es muy frecuente que por diseño o falta de mantenimiento se presenten anomalías hidráulicas, como cortos circuitos y volúmenes muertos, lo que se puede detectar con el perfil de la DTR (Fogler, 1986).

En contraposición al tiempo de residencia nominal (θ), el cual se puede decir no corresponde con la realidad, la prueba de trazador permite obtener una estimación fiel del tiempo de residencia promedio efectivo (t_m) del reactor.

Para determinar t_m se calcula el primer momento de la función de la DTR, $E(t)$. De esta manera, el tiempo de residencia medio es:

$$t_m = \int_0^{\infty} tE(t)dt \quad (1.15)$$

Así, el volumen real exacto del reactor es:

$$V_{REAL} = t_m \cdot v \quad (1.16)$$

1.4.5.2. Otros momentos de la distribución de los tiempos de residencia

La mejor manera de comparar varias distribuciones es mediante el uso de sus momentos, en lugar de tratar de comparar sus funciones de distribución por completo. Para este propósito se emplean tres momentos: el primero de ellos es el tiempo de residencia promedio; el segundo que más comúnmente se emplea, se calcula considerando el tiempo medio de residencia y se conoce como varianza o cuadrado de la desviación estándar. La varianza de la distribución se define como (Fogler, 1986):

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^2 E(t)dt \quad (1.17)$$

La magnitud de este momento es un indicador de la dispersión de la distribución.

El tercer momento se calcula considerando también el tiempo medio de residencia y se llama sesgo. Está definido por:

$$s^3 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^3 E(t) dt \quad (1.18)$$

El sesgo determina la extensión de la distribución que se encuentra sesgada hacia el lado derecho (valor positivo) o hacia el lado izquierdo (valor negativo) con respecto al tiempo de residencia medio.

Prácticamente, estos tres parámetros son suficientes para caracterizar y analizar razonablemente cualquier distribución del tiempo de residencia de un reactor.

1.5. DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TIPO FACTORIAL

1.5.1. Introducción a la planificación de experimentos

El objetivo de la planificación y del análisis estadístico de experimentos es lograr una recolección eficiente de los datos y culminar con la obtención de resultados fácilmente interpretables, inequívocos y comunicables.

En los experimentos que se llevan a cabo en las áreas de ciencias físicas, en ingeniería y en la industria, similares a los que se contemplan en el presente trabajo, el interés no se concentra en comparar tratamientos ya definidos, sino en determinar el efecto de distintos factores individuales (temperatura, tiempo, pH, y/o varios ingredientes de una formulación) sobre un proceso o un producto. Se trata de detectar los cambios en una variable de respuesta de un proceso, tras introducir cambios controlados en sus variables operativas (experimentos exploratorios).

La problemática del experimentador es saber como estudiar un proceso complejo de tantos factores, que además pueden variar dentro de rangos muy amplios, sin tener que realizar una infinidad de corridas.

Por otro lado, la estrategia de variar un solo factor a la vez es totalmente ineficiente; debido a la ignorancia de interacciones potencialmente existentes, los resultados pueden ser aparentemente inconsistentes y contradictorios, dificultando la interpretación y dando una estimación errónea del efecto de los factores principales (Wheeler 1990).

Además, en muchas ocasiones la variable de respuesta del sistema depende no sólo de los parámetros operativos individuales, sino de ciertas interacciones entre ellos.

1.5.2. Planes factoriales fraccionarios

Para detectar las interacciones, se necesita un plan en el cual exista un entrecruzamiento parcial o total de todos los factores. Con un plan factorial completo se evalúan todas las combinaciones posibles de los factores a sus diferentes niveles. Para un experimento que tenga pocos factores el costo de un plan factorial completo puede ser aceptable, mientras que para un estudio que contenga un número considerable de factores el número de corridas podría ser exorbitante.

A manera de ejemplo, el plan factorial completo para estudiar 7 factores con dos niveles operativos cada uno tiene 128 ensayos (2^7), los cuales ascienden a 2187 (3^7) si los factores tienen tres niveles.

Además del tiempo, la labor y el elevado costo del plan factorial completo para un estudio multifactorial podrían ser redundantes. Las N corridas de un plan factorial completo permiten definir $N-1$ contrastes o comparaciones de grupos. Éstos permiten determinar el efecto de todas las $N-1$ interacciones (dobles, triples, etc.) y factores principales existentes.

El problema es que se obtiene mucha información inútil, sobretodo con respecto a las interacciones de orden superior. Al ignorar las interacciones de orden superior (entre más de tres factores), las cuales son de poca utilidad en los estudios exploratorios, se puede reducir el número de ensayos requerido por el estudio a una pequeña fracción de las corridas del plan factorial completo (Wheeler, 1990).

Los planes reducidos se llaman planes factoriales fraccionarios. Estos planes permiten detectar las interacciones importantes, sin tener que realizar un número considerable de corridas o pruebas. El precio que se debe pagar al reducir el número de corridas en fracciones cada vez más pequeñas, es una reducción subsecuente en la resolución del plan, es decir, disminuye la capacidad para distinguir los efectos que producen las interacciones del mismo orden o de órdenes diferentes (pueden confundirse por ejemplo las interacciones de AB y CD de cuatro factores A, B, C y D).

Los planes de resolución 5 o mayores permiten tener los efectos totalmente separados, sin confusión entre los efectos principales (A, B, C, D), ni entre las interacciones de tipo doble (el efecto causado por AB se estima separadamente del de CD). La resolución 4 es el nivel mínimo recomendado puesto que logra separar por lo menos los efectos principales de las interacciones dobles (ninguna interacción doble se confunde con un factor principal).

Los planes fraccionarios están conformados por un número de corridas extraídas de las combinaciones de un plan factorial completo. Durante muchos años, la selección de grupos de corridas para formar planes factoriales óptimos (menor número de corridas, mayor resolución) ha sido un campo fecundo de la investigación en matemática estadística. Por lo que hoy se dispone en la literatura de una gran variedad de catálogos de planes (Wheeler, 1990) listos para que los investigadores los utilicen en muchas áreas sin que sea necesario que sean especialistas en ellos.

1.5.3. Planes de Plackett y Burman

L. L. Plackett y J. P. Burman (1948) fueron algunos de los pioneros que propusieron un conjunto de planes fraccionarios optimizados para poder estudiar un máximo de factores con un mínimo de ensayos. Como ejemplo, se puede observar la matriz experimental utilizada en este trabajo: Tablas 1.5 y 2.5 (plan de 16 corridas con 6 factores de 2 niveles o modalidades). Las dos modalidades (+ y -) de cada parámetro se codifican, siendo -1 su nivel inferior y $+1$ su nivel superior.

Cada línea de la matriz experimental de Plackett y Burman (P. B.) tiene una corrida y establece la manera de combinar los factores para cada uno de los 16 tratamientos que dicta el plan. Al mismo tiempo cada columna define a la vez un contraste, siendo $+1$ y -1 los diferentes coeficientes c_j . El resultado de los ensayos se registra en cada una de las últimas columnas reservadas a la o las variables de respuesta.

Los diseños experimentales de P. B. tienen un cierto número de características matemáticas que les dio la aptitud de minimizar el número de ensayos requeridos y de discernir sin equivocación cuáles son los factores activos y cuáles los factores inertes, siempre y cuando los datos adquiridos sean confiables.

Cada matriz está conformada por un ensamble balanceado de contrastes ortogonales que le da una de sus características más importantes, la de estimar el efecto de los factores de forma independiente y con una precisión similar para todos. Como planes balanceados, todos los factores tienen el mismo número de modalidades o niveles, el cual debe ser un número primo ($L= 2, 3, 5$, etc.).

El número de corridas N de un plan de P. B. es siempre proporcional a L^2 , dando lugar de esta forma a matrices de 4, 8, 12, 16, 20 y 24 ensayos, etc. para los factores con dos modalidades ($L=2$) y de 9, 27 y 81 corridas para $L=3$. De estos grupos, los planes geométricos de 2 modalidades (para los cuales $N=2^k$, $k=1, 2, 3$, etc.) son los más útiles y populares (planes de 8, 16, 32 ó 64 corridas). El número máximo de factores que pueden utilizarse con un plan de P. B. de N corridas es $N-1$ (plan saturado de baja resolución). La resolución es un indicador del nivel entre efectos e interacciones, aumenta al disminuir el número de factores que se utiliza en un plan dado.

1.5.4. Análisis de datos de los planes de Plackett y Burman

El análisis de varianza es la principal herramienta estadística que se emplea para analizar los datos de un plan fraccionario como los de Plackett y Burman (Fall *et al.*, 2003). En el análisis, la variabilidad total de la variable de respuesta se reparte en dos

componentes principales que representan la variabilidad intergrupala, expresión que considera la diferencia entre tratamientos, y la variabilidad intragrupal, la cual es resultado de los errores. La ecuación para el análisis de varianza al primer nivel de descomposición de la suma de cuadrados (SC) está dada por la siguiente ecuación:

$$SC_T = SC_{INTER} + SC_{INTRA} \quad (1.19)$$

donde

SC_T	suma total de cuadrados de la variable de respuesta
SC_{INTER}	contraparte intergrupala de la suma total de cuadrados
SC_{INTRA}	contraparte intragrupal de la suma total de cuadrados

Para identificar los factores que causan la diferencia entre los tratamientos, se realiza una segunda descomposición de SC_{INTER} en contribuciones individuales de sumas de cuadrados atribuibles a cada una de las columnas del plan. Para este fin se utiliza la noción de contraste, aprovechando el hecho de que cada columna de una matriz de P.B. en sí misma corresponde a un contraste, es decir, a un vector de comparación entre 2 grupos de corridas (Tablas 1.5 y 2.5). De manera general, el valor del contraste para una columna está dado por:

$$C = \sum_{j=1}^n \alpha_j Y_j \quad \text{con la condición} \quad \sum_{j=1}^n \alpha_j = 0 \quad (1.20)$$

donde

C	valor estimado del contraste
j	número de corrida ($j=1, \dots, n$)
α_j	coeficientes de la columna considerada (-1 ó +1)
Y_j	respuesta registrada para cada una de las corridas

A manera de ejemplo, el contraste para la columna A de la Tabla 4.5 compara la respuesta promedio de 2 grupos de corridas, siendo los 8 ensayos donde A está en su nivel inferior (-1) *versus* los 8 ensayos en que A está en su nivel superior (+1).

Se puede obtener la suma de cuadrados para cada contraste, siendo:

$$SC(C) = \frac{C^2}{\frac{1}{r} \sum_{j=1}^n \alpha_j^2} \quad (1.21)$$

En la expresión anterior el denominador es un término que depende del número de repeticiones (r) de las corridas.

Un plan de P. B. de N corridas permite definir un número máximo de $N-1$ contrastes ortogonales, con los cuales se realiza la descomposición de la suma de cuadrados SC_{INTER} de los grupos, como:

$$SC_{INTER}=SC(C_A)+SC(C_B)+\dots+SC(C_O) \quad (1.22)$$

La ecuación anterior corresponde al caso de un plan de 16 corridas que cuenta con 15 contrastes de A a O. Los términos similares a $SC(C_A)$ son la suma de cuadrados asociada a cada contraste. $SC(C_A)$ refiere a la suma de cuadrados del contraste A.

Para definir los contrastes significativos se compara la suma de cuadrados de cada contraste con la suma de cuadrados SC_{INTRA} . La utilización del valor de la “ F ” de Fisher y la representación de las sumas de cuadrados en un diagrama de Pareto, son dos de las diferentes técnicas que existen para identificar los contrastes significativos. Para determinar cuáles factores o interacciones corresponden a los contrastes significativos, es necesario referirse a ciertas tablas específicas, por ello estas tablas suelen acompañar a los planes. La separación de los efectos de los factores y de las interacciones es más sencilla cuando los planes tienen una mayor resolución.

En la Tabla 1.4 se muestra la matriz completa de P.B. para 16 corridas.

Los planes de P.B. establecen que, cuando se desean analizar 6 factores de dos niveles cada uno, tal y como se llevará a cabo en el presente trabajo, se deben elegir únicamente las columnas de los factores A, B, D, G, H y N, obteniéndose una matriz reducida (de 6 por 16), con la cual se conforman 16 corridas con distintas combinaciones de los 6 factores a analizar. La matriz reducida se muestra en la Tabla 1.5.

Sin embargo, es muy importante mencionar que los 9 factores no elegidos (C, E, F, I, J, K, L, M y O), evalúan las interrelaciones de los factores principales, por lo que se consideran dentro del análisis de varianza para evaluar alguna aportación combinada significativa.

Tabla 1.4. Matriz completa de P. B. de 16 corridas.

		Factores													
Corrida	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
3	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
4	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
5	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
6	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
8	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1
9	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1
10	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
11	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
12	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1
13	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
15	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
16	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1

Tabla 1.5. Matriz reducida de P. B. de 16 corridas para 6 variables.

		Factores				
Corrida	A	B	D	G	H	N
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	-1	-1	+1	+1	+1	-1
4	-1	-1	+1	+1	-1	+1
5	-1	+1	+1	-1	-1	-1
6	-1	+1	+1	-1	+1	+1
7	-1	+1	-1	+1	+1	-1
8	-1	+1	-1	+1	-1	+1
9	+1	+1	-1	-1	-1	+1
10	+1	+1	-1	-1	+1	-1
11	+1	+1	+1	+1	+1	+1
12	+1	+1	+1	+1	-1	-1
13	+1	-1	+1	-1	-1	+1
14	+1	-1	+1	-1	+1	-1
15	+1	-1	-1	+1	+1	+1
16	+1	-1	-1	+1	-1	-1

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Justificación. Hipótesis. Objetivos.

JUSTIFICACION E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACION.....3
JUSTIFICACIÓN 3
HIPÓTESIS4

JUSTIFICACION E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACION

JUSTIFICACIÓN

Con base en la problemática planteada en los párrafos precedentes, y como se ha puesto en evidencia en otros países, se considera que en México también los talleres de servicios para autos son una de las actividades comerciales más contaminantes de las aguas, además de producir un volumen importante de residuos peligrosos (Paxeus, 1996; WEF, 1995).

El separador de aceites es el sistema de pretratamiento más recomendado para los talleres mecánicos. En México, por razones de simplicidad, operatividad y costo, la tecnología más recomendada y utilizada es el separador convencional. Sin embargo, problemas de mantenimiento y de diseño podrían impedir que éstos funcionen adecuadamente.

Como se mostró previamente, no existe un diseño muy específico para el separador convencional empleado en talleres automotrices, puesto que los únicos criterios que existen, establecidos por el American Petroleum Institute, A.P.I. (A. P. I., 1990), no han sido analizados considerando las dimensiones de los separadores que se manejan en los talleres.

Además, según estudios del A.P.I., se sabe que los separadores de aceites de tipo convencional, similares a los utilizados generalmente en los talleres mecánicos, muy difícilmente permiten obtener un agua residual con una concentración inferior a 100mg/L de grasas y aceites, mientras que la norma mexicana (NOM-002-ECOL-1996; D. O. F., 1998) establece los límites de 100mg/L para los vertidos al alcantarillado.

Por otra parte, la bibliografía (Paxeus, 1996; Alther, 1997) señala que la presencia de detergentes provoca serios problemas de emulsión, provocando graves deficiencias en los separadores, razón por la cual se debe poner especial atención al caso de los servicios de lavado y demás talleres automotrices que utilicen sustancias jabonosas en sus actividades. De esta manera, se vuelve oportuno evaluar los separadores existentes y optimizarlos, teniendo en cuenta las exigencias reglamentarias locales y las nuevas avenidas de diseño exploradas en la literatura.

Entre los beneficios que se esperan del presente proyecto, se encuentra el poder establecer criterios de diseño específicos para separadores de grasas y aceites para talleres automotrices, los cuales surgirán del desarrollo de un modelo piloto, relacionando la respuesta de un separador gravitacional de aceite con la calidad de las aguas, el régimen de escurrimiento y los parámetros operacionales más significativos.

HIPÓTESIS

Se pone como hipótesis, que la eficiencia del separador convencional puede mejorarse significativamente si se toman en cuenta de manera rigurosa las propiedades físicas de la fase aceitosa de los efluentes en estudio y se establece una relación entre los parámetros operacionales y la hidrodinámica del separador *versus* la calidad efectiva del agua tratada.

OBJETIVOS **5**
OBJETIVO GENERAL..... 5
OBJETIVOS PARTICULARES 5

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este proyecto de investigación es el de evaluar y optimizar los separadores de grasas y aceites que se utilizan para el pretratamiento de las aguas residuales generadas en los talleres automotrices.

OBJETIVOS PARTICULARES

a) Evaluar el desempeño de los separadores de aceites existentes en la Ciudad de Toluca.

b) Medir y determinar el intervalo de variación de las propiedades físicas de los residuos aceitosos contenidos en las aguas residuales de los servicios automotrices (viscosidad y densidad).

c) Evaluar la susceptibilidad a la separación por gravedad de la fase aceitosa de las aguas para diferentes tipos de talleres y servicios para autos.

d) Utilizando como base los datos relacionados con el intervalo de variación de las propiedades físicas de las gotas de aceite, diseñar un separador piloto convencional considerando el método establecido por el A.P.I. Es necesario que el separador se construya dotándolo de una flexibilidad tal, que permita configurarlo y evaluarlo, ya sea considerando los criterios de diseño convencionales u otras condiciones de funcionamiento que se deseen explorar.

e) Caracterizar el régimen de escurrimiento en el separador piloto (realizando un estudio de distribución de los tiempos de residencia), en función de los caudales, longitudes del separador, tamaño, ubicación y tipos de accesorios de entrada y salida.

f) Utilizando un plan estadístico, estudiar y determinar la respuesta del separador (concentración del efluente tratado) de acuerdo con su configuración (longitud, altura y accesorios).

g) Proponer criterios de diseño para separadores de aceites convencionales específicos para los talleres mecánicos.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

2. METODOLOGÍA	39
2.1. TRABAJO DE CAMPO: VISITA A LOS TALLERES Y EVALUACIÓN DE LOS SEPARADORES EXISTENTES	39
2.1.1. Selección de los talleres	39
2.1.2. Recolección de muestras	40
2.1.3. Determinación de los caudales de operación de los talleres.....	42
2.1.4. Características base de las aguas	42
2.1.4.1. Características base de las aguas residuales.....	43
2.1.4.2. Características base de los aceites nuevos y usados.....	44
2.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEPARADOR PILOTO	45
2.3. EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DEL SEPARADOR	46
2.3.1. Diseño experimental.....	46
2.3.2. Método de realización de las pruebas con trazador	48
2.4. PRUEBAS PRELIMINARES A LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SEPARADOR.....	51
2.4.1. Selección del aceite modelo y sistema de mezcla aceite/agua	51
2.4.1.1. Selección del aceite modelo	51
2.4.1.2. Selección del sistema de mezcla aceite/agua	51
2.4.1.3. Determinación de la distribución del tamaño de partículas de aceite	55
2.5. EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL ACEITE	57
2.5.1. Evaluación de la separación en columna batch.....	57
2.5.2. Evaluación de la eficiencia del separador piloto.....	59
2.5.2.1. Diseño experimental.....	59
2.5.2.2. Procedimiento de realización de las corridas	60
2.5.3. Optimización del separador piloto.....	61
2.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS.....	64

2. METODOLOGÍA

2.1. TRABAJO DE CAMPO: VISITA A LOS TALLERES Y EVALUACIÓN DE LOS SEPARADORES EXISTENTES

Los principales objetivos que se persiguieron durante esta fase de campo fueron:

1. Observar el modo de operación de los talleres que producen el mayor volumen de aguas residuales contaminadas.
2. Caracterizar las aguas residuales generadas.
3. Estimar las cantidades de aguas residuales que descargan.
4. Evaluar el desempeño de los separadores existentes.
5. Obtener las características de los aceites que se manejan en los talleres.

De manera general, se adoptará el término “taller automotriz” o simplemente “taller” para referirse a aquellos negocios en los cuales se llevan a cabo actividades de mantenimiento, limpieza y/o reparación de vehículos automotores. Entre estas actividades podemos mencionar: la reparación de partes mecánicas, reparación de sistemas eléctricos, cambios de aceite, servicio de lavado y engrasado, hojalatería, pintura, entre otras.

2.1.1. Selección de los talleres

Se eligieron distintos talleres ubicados en la Ciudad de Toluca que fueran, en términos del volumen de aguas generadas, representativos de las actividades automotrices más significativas.

El primer enfoque, como pudiera resultar obvio, centralizó principalmente el análisis en aquellos talleres que llevan a cabo labores de limpieza y de cambio de aceite (centros de lavado y engrasado).

Se consideraron también dentro del análisis, talleres de reparación de radiadores y de mecánica diesel, quienes, junto con los lavados de autos, son los lugares de este sector donde se generan la mayor cantidad de aguas residuales.

En el caso de los talleres mecánicos de camiones (diesel), el personal realiza sus actividades sobre pisos y planchas de concreto expuestas parcial o totalmente, en la mayoría de los casos, a la acción directa de las aguas pluviales. Una gran cantidad de las grasas y aceites derramadas son arrastradas voluntaria (por el lavado de los pisos del taller) o involuntariamente (debido a los escurrimientos pluviales) al drenaje y alcantarillado del taller, descargando, generalmente, al sistema de alcantarillado municipal. Lo mismo sucede cuando existen precipitaciones pluviales sobre los amontonamientos descubiertos de refacciones usadas.

Para el caso de los talleres de reparación de radiadores, la generación de aguas residuales se relaciona directamente con el uso permanente de los tanques de prueba que se utilizan para evaluar la hermeticidad de los radiadores.

A partir de lo anterior, se eligieron dieciocho talleres, justificados por la frecuencia relativa de cada tipo de negocio. Entre los 18 talleres analizados se encontraban talleres de lavado y engrasado, talleres mecánicos diesel y talleres especializados en radiadores.

El criterio de selección de los sitios específicos se determinó únicamente por representatividad, basándose en un gran número de visitas previas que se realizaron a diversos talleres conjuntamente con la Dirección de Ecología del H. Ayuntamiento de Toluca.

Es de suma importancia mencionar que los talleres seleccionados se eligieron considerando también el gran volumen de usuarios que atienden semanalmente, observando que los fines de semana es cuando atienden a una mayor cantidad de clientes.

2.1.2. Recolección de muestras

Para determinar las características de las aguas residuales que producen los talleres antes mencionados y la eficiencia de sus separadores de grasas y aceites, se recolectaron, cuando los talleres contaban con estos sistemas, diversas muestras de sus aguas de desecho a la entrada y a la salida de los separadores.

Cuando los talleres no tenían separadores de grasas y aceites las muestras se tomaron únicamente a la entrada de los registros sanitarios de los establecimientos.

Las muestras recolectadas a la entrada de los separadores y, en su defecto, a la entrada de los registros, fueron muestras compuestas conformadas por distintas fracciones de

agua residual que se tomaron durante el proceso de lavado y/o engrasado de algún vehículo. Para ello se tomaron de manera continua volúmenes pequeños de aguas residuales (de aproximadamente 300 mL) en intervalos regulares de 40 s y se depositaron en una cubeta de 19 L. Una vez que terminó la limpieza del auto, camioneta o camión, según se tratara, se mezcló generosamente el agua residual contenida dentro de la cubeta con el fin de homogeneizarla. Acto seguido se tomaron una o dos muestras de agua de 1 L para someterlas a las pruebas de laboratorio correspondientes.

En algunos casos, parte del contenido del agua que se encontraba dentro de la cubeta de recolección se vació dentro del embudo de decantación para someterla a la prueba de susceptibilidad de separación, con el objetivo de determinar la concentración de aceite altamente emulsificado.

La norma NOM-002-ECOL-1996 (D.O.F., 1998) establece que las muestras de agua residual a las cuales se les desee determinar su concentración de grasas y aceites deben ser siempre muestras simples; sin embargo, debido a la duración de los procesos de lavado de los talleres automotrices (de 20-30 min y mayores), sería necesario, para tener una medida confiable de las características de las aguas residuales generadas, recolectar un gran número de muestras simples durante todo el proceso de limpieza y, posteriormente, obtener el promedio de sus concentraciones, lo que resulta poco económico para los fines de estudio que se persiguen y no apto para el proyecto de investigación.

Debido a lo anterior, se siguió el proceso de recomposición de muestras compuestas que se mencionó en párrafos precedentes, con las posibles desventajas que ello representa.

Las demás muestras recolectadas se constituyeron únicamente por muestras simples.

Finalmente, para analizar la calidad del agua residual generada en los talleres de reparación de radiadores, se tomó una muestra de agua directamente de sus respectivos tanques de prueba y lavado. Para ello, se agitó el agua presente dentro de su tanque de prueba con el fin de homogeneizar su contenido y posteriormente se introdujo el recipiente de muestreo.

Todas las muestras se recolectaron en recipientes de cristal claro transparente de 1 L.

2.1.3. Determinación de los caudales de operación de los talleres

Para calcular la cantidad de agua que utilizan los distintos talleres para lavar los vehículos, fue necesario analizar tanto el procedimiento como el sistema que emplea cada uno de ellos.

De esta manera, se determinó la cantidad de agua que utilizan los talleres visitados, observando su sistema de circulación y de manejo de agua, y “aforando” cada uno de ellos en función del procedimiento que ponen en práctica en cada sitio. Así, se calculó el caudal que produce cada sistema hidráulico o la cantidad de cubetas con agua necesarias para lavar cierto vehículo.

El caudal que podía producir cada sistema hidráulico se determinó llenando alguna de las cubetas vacías presentes en el taller con el chorro de agua que generaba el sistema, y anotando el tiempo necesario para llenarla por completo. Posteriormente, con ayuda de un matraz aforado con capacidad para 1 L se definió la cantidad de agua vertida dentro de la cubeta. Una vez que se conoció el volumen de agua y el tiempo requerido para llenar el balde fue posible calcular el caudal.

En aquellos talleres en los que los autos se lavaban con cubetas y algunos otros recipientes, se anotó el número de cubetas de cada tipo necesarias para lavar algún vehículo y la duración del procedimiento de lavado. Finalmente, con un matraz aforado, se calculó el volumen de agua que contuvo cada uno de los recipientes que se utilizaron y con ello el volumen total que se requirió para lavar el vehículo. El caudal utilizado en el taller se calculó con base en el volumen total empleado y el tiempo que duró el procedimiento de lavado del vehículo.

Durante la visita a los talleres de lavado y engrasado, fue posible observar un sistema de lavado en forma de marco con distintas perforaciones en todo su perímetro interior, por las cuales salía expulsada cierta cantidad de agua que se utilizaba para lavar y enjuagar los autos. Para calcular el caudal que generaba este sistema, se calculó el caudal producido por una de sus perforaciones (llenando un frasco para muestreo con capacidad para 1 L de agua con el chorro de agua que expulsaba la perforación y anotando el tiempo de llenado) y se multiplicó por el número total de orificios del marco.

2.1.4. Características base de las aguas

Las características base de las aguas residuales oleosas generadas en los talleres se determinaron utilizando las muestras recolectadas durante la etapa de visita a estos establecimientos.

Además, para determinar y definir de una manera más precisa las propiedades de las grasas y aceites usados, que se manejan en los talleres y que se encuentran presentes en las aguas residuales de estos centros, se recolectaron distintas muestras de estos fluidos de los tambos de acopio en los que se almacenan y, en ocasiones, cuando la situación lo permitió, se tomaron algunas muestras de aceites usados directamente de los motores y de los diferenciales de los vehículos, al momento de hacer su respectivo cambio de aceite.

También se estudiaron las propiedades de diversos aceites nuevos y de algunos combustibles como gasolina y diesel.

Para complementar la información, se recopilaron las propiedades de un gran número de aceites comerciales nuevos representativos.

2.1.4.1. Características base de las aguas residuales

A las muestras de agua residual que se recolectaron por duplicado se les realizó la prueba de susceptibilidad de separación por gravedad, utilizando un procedimiento desarrollado por el A.P.I., el cual consiste en decantar, *in situ*, la muestra recolectada dentro de un embudo de separación (A.P.I., 1990). En el Anexo A se describe el método para realizar esta prueba.

Al final de la prueba de susceptibilidad, se tomó una porción del agua (1 L) que quedó contenida en la parte inferior del embudo, la cual determinó la cantidad de aceite que se encontraba en emulsión, ya que se considera que la fracción de aceite que puede ser separada mediante la acción de la fuerza de gravedad (aceite no emulsificado) asciende hasta la superficie del agua después de los treinta minutos de duración del ensayo (A.P.I., 1990).

Para determinar el porcentaje de aceite que se encontraba emulsificado, se comparó la concentración de grasas y aceites de las muestras expuestas a la prueba de susceptibilidad, contra la concentración de las muestras que no se analizaron con este procedimiento.

Es necesario mencionar que todas las pruebas de susceptibilidad de separación fueron realizadas a temperatura ambiente.

Todas las muestras de agua residual que se recolectaron en campo (las muestras expuestas a la prueba de susceptibilidad de separación y las muestras puntuales tomadas en la entrada y en la salida de los separadores de aceite y en algunos otros

puntos de los sistemas de alcantarillado de los talleres), se llevaron al Laboratorio de Calidad del Agua para determinar su concentración de grasas y aceites, conductividad, DQO, pH y SST, de acuerdo con los métodos de análisis normalizados (APHA, 1989).

2.1.4.2. Características base de los aceites nuevos y usados

Se determinó, con la mayor precisión posible, la densidad de los aceites usados recolectados en los talleres, utilizando el método que establece la norma ASTM D 1429 (ASTM, 1997). Y la densidad de los aceites nuevos que, según los empleados de los talleres visitados, más utiliza la gente para lubricar los motores de sus vehículos.

Para determinar la densidad de los fluidos estudiados, se empleó una copa de densidad marca GARDCO con capacidad para 8.321 g de agua (25 °C), de 26.5 mm de altura por 25.4 mm de diámetro, y con un peso aproximado de 39 g. La forma adecuada para operar esta copa de densidad o densímetro se muestra en el Anexo B.

El densímetro, de acuerdo con la información que proporcionan los fabricantes, cumple con las especificaciones que establece la A.S.T.M.

Los valores de la densidad y la viscosidad de los aceites nuevos y usados que se analizaron, se determinaron a 10 y 15 °C. La temperatura de 10 °C se eligió porque es la temperatura media del mes más frío del año que históricamente presenta la Ciudad de Toluca (C.N.A., 1994), mientras que la temperatura de 15 °C es la temperatura media anual de esta misma comunidad.

2.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEPARADOR PILOTO

El separador piloto se diseñó, al inicio, con base en el criterio que establece el A.P.I. (A.P.I., 1990) para separadores de grasas y aceites convencionales (tamaño de gota de aceite de 0.15 mm). Este criterio de diseño se utilizó, únicamente, para definir ciertas dimensiones básicas que debería tener el separador piloto. No se tomaron en cuenta rigurosamente, debido a que no pueden aplicarse a este caso, los criterios referentes a proporciones entre dimensiones, ni los límites de altura mínima.

Se tomó la decisión de construir el separador piloto con placas de acrílico transparente (12 mm de espesor), un material resistente que permitiría observar el comportamiento del flujo y de las gotas de aceite que contendría el influente.

Para poder determinar las dimensiones aproximadas del separador piloto, siguiendo el criterio que considera el tamaño de la gota de aceite de 0.15 mm, se emplearon las características físicas más desfavorables de las aguas residuales producidas y de los aceites usados que se manejan en los talleres de la Ciudad de Toluca:

- Caudal medio de operación de 10 L/min y máximo de 15 L/min
- Temperatura de 10 y 15 °C

El separador piloto debería ser lo suficientemente flexible para analizar distintas condiciones de flujo, por lo cual se consideró en su diseño la capacidad de poder operar con diversas longitudes, diferentes vertedores de entrada y de salida, un caudal máximo de casi 15L/min, diversas alturas o niveles de agua y una mampara de retención de la fase flotante ubicada al final del separador, que pudiera funcionar con diversas profundidades y posiciones.

2.3. EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DEL SEPARADOR

2.3.1. Diseño experimental

La experimentación consistió en realizar pruebas con trazador para evaluar el comportamiento de distintas configuraciones del separador, con el objetivo de determinar el efecto que producen las variables estudiadas (dimensiones del separador, posiciones y tipos de vertedores) en el flujo del sistema.

Para no evaluar todas las configuraciones posibles, se optó por utilizar un plan estadístico que reduce el número de corridas necesarias a un mínimo óptimo.

Se utilizó un plan estadístico de Plackett y Burman con 16 ensayos.

Los 16 ensayos de ese plan permiten alcanzar el nivel de resolución número 4, nivel mínimo necesario para estimar de manera separada, los efectos que producen los factores principales y los que generan las interacciones dobles (el efecto que provoca una interacción doble no se confunde con el efecto que causa un factor principal).

Las variables estudiadas, todas relacionadas con la configuración del separador, son: longitud del separador, tirante de agua, posición y profundidad de la mampara de retención, tipo de vertedor de entrada y tipo de vertedor de salida. La Figura 2.1 presenta un dibujo que ilustra las variables operativas del separador piloto.

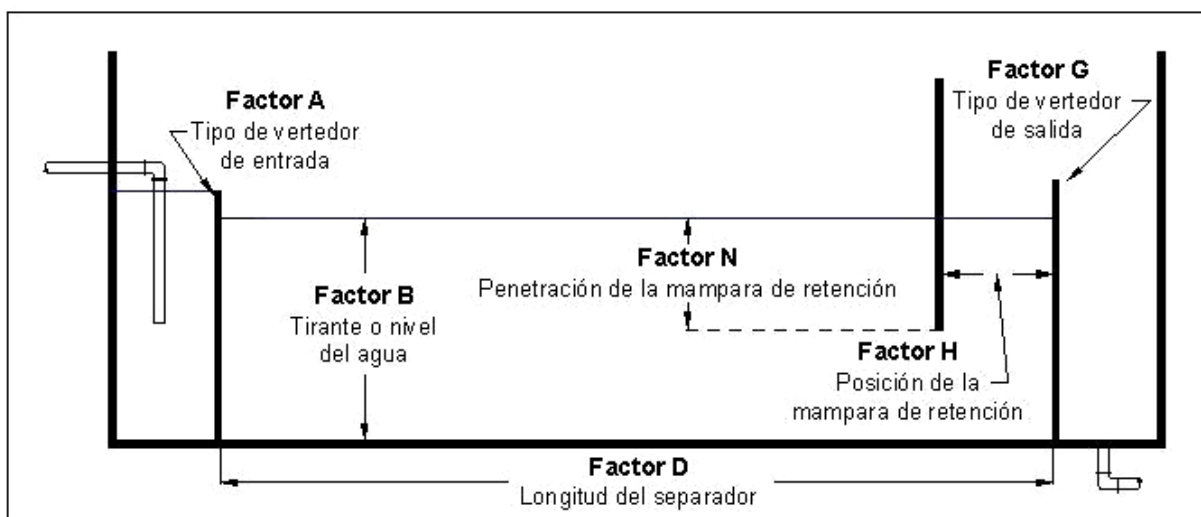


Fig. 2.1. Parámetros operativos del separador piloto.

La Tabla 2.1 muestra las 6 variables que se analizaron, y los dos valores o niveles operativos propuestos para cada una de ellas; mientras que, en la Tabla 2.2 se puede observar la matriz experimental conformada por las 16 pruebas específicas que establece el plan de Plackett-Burman (P.B.) de 16 ensayos para 6 variables.

Tabla 2.1. Variables operativas analizadas.

Identificación del factor	Descripción	Valor inferior (-)	Valor Superior (+)
A	Vertedor de entrada	Rectangular	Triangular múltiple
B	Nivel del agua	40 cm	55 cm
D	Longitud del separador	1.50 m	1.90 m
G	Vertedor de salida	Rectangular	Placa con dos tubos
H	Posición de la mampara de retención	20 cm	40 cm
N	Porcentaje de penetración de la mampara de separación con respecto al nivel del agua	30 %	50 %

Tabla 2.2. Configuración de las 16 pruebas del plan estadístico.

Corrida	Valor del factor					
	A	B	D	G	H	N
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	+	+
3	-	-	+	+	+	-
4	-	-	+	+	-	+
5	-	+	+	-	-	-
6	-	+	+	-	+	+
7	-	+	-	+	+	-
8	-	+	-	+	-	+
9	+	+	-	-	-	+
10	+	+	-	-	+	-
11	+	+	+	+	+	+
12	+	+	+	+	-	-
13	+	-	+	-	-	+
14	+	-	+	-	+	-
15	+	-	-	+	+	+
16	+	-	-	+	-	-

Para analizar los datos y determinar cuáles eran las variables operativas más significativas, se realizó un análisis de varianza considerando el valor de las variables de respuesta de cada corrida.

Adicionalmente a las 16 pruebas que establece el plan estadístico, se realizaron 2 corridas adicionales similares a la prueba No. 14, con la diferencia de que estas 2 pruebas extra operaron con un vertedor de entrada diferente. Una de ellas funcionó con el vertedor rectangular múltiple y la otra con el vertedor que cuenta con tres orificios.

Con las dos pruebas extra fue posible evaluar el desempeño del vertedor rectangular múltiple y del vertedor con tres orificios, comparando su comportamiento con el vertedor de entrada de la corrida No. 14 (triangular múltiple) y determinando, una vez que el plan estadístico reveló cuáles eran los parámetros operacionales más significativos, si alguno de ellos podría proporcionar un beneficio hidrodinámico superior al de los dos vertedores de entrada contemplados dentro del plan.

2.3.2. Método de realización de las pruebas con trazador

La evaluación hidrodinámica del separador se llevó a cabo empleando el método de prueba de trazador del escalón positivo (Fogler, 1986) combinado con el plan estadístico de P.B. de 16 ensayos (Wheeler, 1990).

La Figura 2.2 muestra un diagrama general de operación del separador piloto y sus accesorios para las pruebas con trazador.

Los principios de la prueba del escalón positivo se presentaron previamente en los antecedentes del presente trabajo, en donde se expuso también como obtener la función de distribución de los tiempos de residencia hidráulica $E(t)$, y el tiempo medio de residencia t_m de cada una de las configuraciones dictadas por el plan.

Para realizar las pruebas se utilizó como trazador cloruro de sodio (NaCl) y se midieron sus niveles a la salida del separador mediante conductivimetría. Para ello se utilizó un medidor de conductividad que se acopló a un sistema de adquisición de datos computarizado. El software que se empleó para realizar la adquisición de datos fue Adquidatos-UAEM (Illagorre y Rivas, 2002).

Adquidatos-UAEM es un software de adquisición de datos y control desarrollado en el CIRA, el cual permite realizar fácilmente la recolección de datos a partir de medidores y sensores comunes de laboratorio, operando conjuntamente con un hardware de

adquisidor de datos especial (ADC1). El AdquiDatos UAEM es capaz de registrar datos de hasta 16 canales analógicos, con intervalos de muestreo desde un segundo, gráficar y visualizar los datos a tiempo real como a tiempo diferido, hacer el control de dispositivos y equipos externos (motores, bombas, mezcladores, calentadores etc.).

Para cada configuración, los correspondientes vertedores de entrada y de salida y la mampara de retención se fijaron agregando silicón en la unión de estas placas de acrílico con las guías del separador piloto. El silicón se dejó secar el tiempo suficiente (un mínimo de 2 horas) para asegurar un sellado hermético.

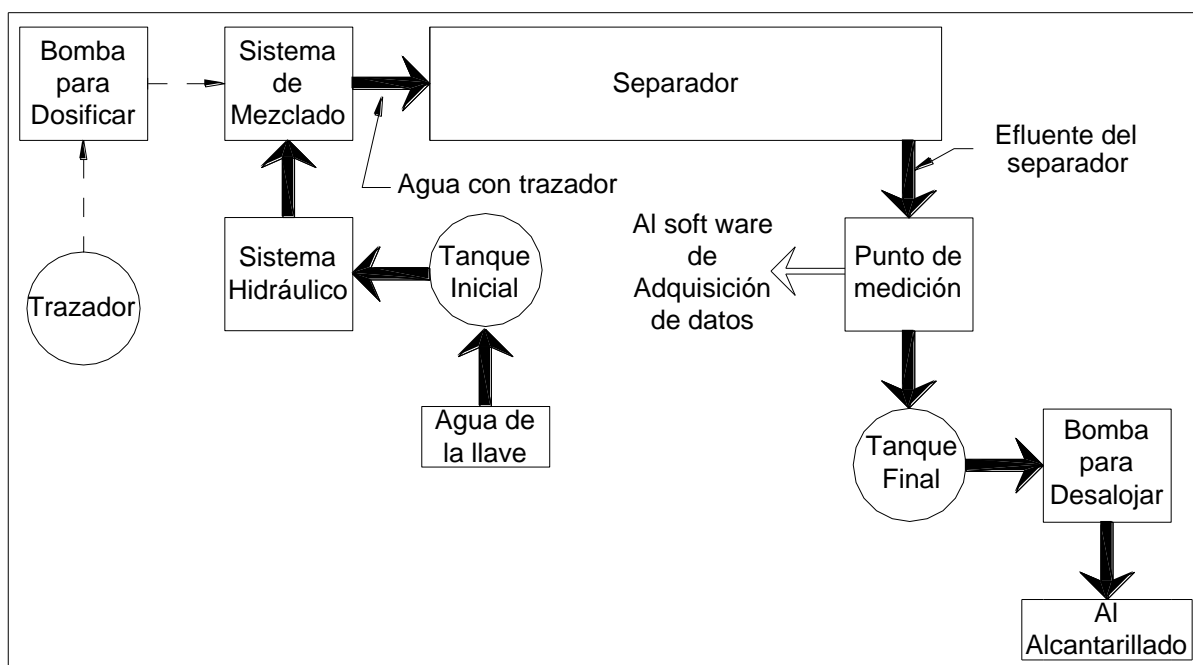


Fig. 2.2. Diagrama de operación del separador piloto para las pruebas con trazador.

Una vez configurado el separador, al inicio de cada corrida la cámara central se llenó por completo con agua de la llave.

Posteriormente y siguiendo el método de prueba del escalón positivo, la cámara receptora del separador se llenó, con un caudal regulado de 14.56 L/min, con agua potable proveniente del sistema hidráulico del modelo, conjuntamente con un caudal de 190 mL/min de trazador, dosificado con una bomba marca Barnant, tipo DL PK con 04-05 l/h-bar y 60 Hz, accionada a su máximo nivel de operación (nivel 10.0). La solución con trazador (32 gNaCl/L) se añadió, a través del sistema de inyección, a la tubería principal del separador.

La adquisición de datos se inició justo en el momento en el que el influente con trazador ingresó a la cámara central del separador por el vertedor de entrada. En ese instante el sistema de monitoreo y adquisición de datos (Adquidatos-UAEM) inició, en intervalos regulares de 15 segundos, el registro de la conductividad a la salida del separador.

Cada una de las pruebas finalizó cuando el software, por espacio de 5 minutos, ya no detectó incremento alguno en la conductividad, alcanzando un valor máximo constante.

Los datos registrados por el software se procesaron siguiendo el método de prueba del escalón positivo (tal y como se presentó en los antecedentes), obteniendo así el tiempo medio de residencia t_m de cada una de las 16 pruebas efectuadas.

Además, cada corrida tiene un tiempo de residencia nominal ($\theta=V/Q$), lo que permite calcular la relación $\varepsilon=t_m/\theta$, relación que se consideró como la variable de respuesta empleada para determinar, con base en los análisis estadísticos, los parámetros operacionales que más influyen en la hidrodinámica del separador.

La relación mencionada previamente (ε) es un parámetro con el cual se puede evaluar la desviación del flujo con respecto al escurrimiento que presenta un flujo pistón, obteniendo una medida cuantitativa de qué tan cercanos o alejados del flujo pistón se encuentran los flujos generados con las 16 configuraciones analizadas. ε debe ser igual a 1.0 para que se presente un flujo adecuado similar, en cuanto a tendencia, a un flujo pistón ideal, pero con la naturaleza que presentan, lógicamente, los flujos pistón reales (dispersión y sesgo).

La variable ε sirve para determinar la posible presencia de zonas muertas y cortocircuitos, pero no proporciona los elementos necesarios para evaluar la dispersión de los flujos ni sus sesgos.

2.4. PRUEBAS PRELIMINARES A LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SEPARADOR

Antes de realizar la serie de corridas correspondientes a la evaluación de la eficiencia, fue necesario llevar a cabo una serie de actividades preliminares muy importantes, relacionadas directamente con la selección del aceite modelo, el diseño y análisis del sistema de mezcla aceite/agua, la evaluación de la distribución del tamaño de las gotas de aceite producidas por el sistema de mezcla y la calibración de las bombas dosificadoras de aceite.

2.4.1. Selección del aceite modelo y sistema de mezcla aceite/agua

Para evaluar el comportamiento del separador se utilizó un influente artificialmente reconstituido. Se buscó generar, dentro del contexto de dicha evaluación, un agua residual con características conocidas y constantes, además de creíbles. La selección se enfocó en dos aspectos: el tipo de aceite y la distribución del tamaño de partículas de aceite en el agua.

2.4.1.1. Selección del aceite modelo

Con las muestras de aceites usados recolectadas durante los estudios de campo previos (visitas a los talleres de la Ciudad de Toluca) y con una extensa revisión bibliográfica de los diferentes tipos de aceites que se encuentran en el mercado (<http://siri.uvm.edu/msds/h/>), fue posible establecer los rangos de las características físicas de diversos aceites nuevos y usados.

Uno de los objetivos fue que el separador piloto se evaluara bajo las condiciones más desfavorables, por lo que el aceite modelo se eligió considerando a aquel aceite o tipo de aceite que tuviera la mayor densidad relativa.

2.4.1.2. Selección del sistema de mezcla aceite/agua

El diseño del sistema de mezcla fue muy importante, porque de él dependió la producción de un efluente modelo representativo, con el cual se evaluara de manera creíble el separador.

El objetivo del sistema de mezcla es fraccionar el aceite en gotas muy finas.

Es importante mencionar que, el A.P.I. (1990) establece que los separadores convencionales muy difícilmente pueden eliminar partículas de grasas y aceites inferiores a 0.15 mm (150 μm), por lo que el influente modelo debería contener una distribución del tamaño de partículas de aceite con un diámetro medio similar.

Para generar el influente modelo más adecuado para evaluar la eficiencia del separador y realizar distintas pruebas en columna batch, se decidieron analizar diversos procedimientos y procesos para producir distintas emulsiones aceite/agua, con la finalidad de obtener un influente con partículas del aceite modelo seleccionado que tuvieran un diámetro medio aproximado de 150 μm .

Paralelamente, existe una norma propuesta por la ASTM que propone un método para generar un efluente modelo para evaluar los separadores. La norma ASTM D 6104 (ASTM, 1997) busca que el agua presente una distribución del tamaño de partículas con al menos el 20 % de ellas inferiores a 50 μm .

Si se considera el límite de 150 μm , el efluente que propone la ASTM parece más conveniente para otro tipo de separadores (por ejemplo el de coalescencia) y no para un separador convencional típico. Por lo que es necesario adoptar los métodos y condiciones que establece la norma, para producir un agua compatible con los límites teóricos del separador convencional.

De esta manera, se analizaron principalmente dos procedimientos: el primero, basado en la circulación de agua potable con aceite a través de un mezclador en línea helicoidal alternado y, el segundo, aplicando el método establecido en la norma ASTM D 6104 (ASTM, 1997), el cual propone que la mezcla se realice transitando el agua y el aceite a través de un tubo de diámetro muy reducido.

El primer procedimiento consiste básicamente en instalar, entre el sistema de inyección y el punto de salida del sistema hidráulico del separador piloto, un mezclador en línea helicoidal con sentidos alternados.

El segundo procedimiento se basa en el método que establece la norma ASTM D 6104 (ASTM, 1997). Este método consiste en diseñar una reducción dentro de la tubería de conducción del sistema que alimenta al separador. Para ello, se colocó dentro de la tubería de circulación (manguera transparente flexible con un diámetro de 1.27 cm), 5cm después del punto de inyección de aceite, un tubo de cobre rígido con una longitud de 10 cm y un diámetro interno de 0.32 cm (1/8 pulg).

En los dos procedimientos el aceite modelo seleccionado se dosificó al influente a través del sistema de inyección del separador piloto, utilizando una bomba dosificadora de pulsos.

Es importante mencionar que en ambos casos, la distribución del tamaño de gotas y su diámetro promedio dependen del nivel de turbulencia, el cual puede evaluarse calculando el número de Reynolds. Por lo que se analizó la mezcla con diferentes caudales de agua para hallar su dependencia.

Tabla 2.3. Características operativas de las pruebas que se realizaron para seleccionar el sistema de mezcla aceite/agua.

Mezclador empleado	Gasto o caudal		Tipo de Bomba dosificadora	Nivel de operación de la bomba	T _{agua} (°C)	T _{aceite} (°C)
	L/min	L/s				
Medio mezclador helicoidal*	13.75	0.23	Dosificadora No. 1	3.0	10	40-44
Un mezclador helicoidal*	11.0	0.18	Dosificadora No. 1	3.0	12	40-43
Dos mezcladores helicoidales*	7.5	0.13	Dosificadora No. 1	3.0	10	40-42
Reducción de diámetro	10.0	0.17	Dosificadora No. 1	2.0	12	38-43
Reducción de diámetro	10.0	0.17	Dosificadora No. 1	5.0	12	39-45
Reducción de diámetro	14.56	0.24	Dosificadora No. 1	2.0	12	43.0
Reducción de diámetro	14.56	0.24	Dosificadora No. 1	3.0	12.0	40-43
Reducción de diámetro	14.56	0.24	Dosificadora No. 1	5.0	11-12	39-43
Reducción de diámetro	10.0	0.17	Dosificadora No. 2	40%	12	39-41
Reducción de diámetro	10.0	0.17	Dosificadora No. 2	50%	12	39-41

*. Mezclador en línea helicoidal alternado con 12 elementos (12 cambios de dirección internos) de 5/8pulg de diámetro (1.59cm) y longitud de 8 1/2pulg (21.6cm).

Las primeras pruebas se llevaron a cabo usando una bomba dosificadora de pulsos marca Barnant, tipo DL PK con capacidad para 4-5 l/h-bar y 60 Hz (dosificadora 1) y, las pruebas posteriores, con una bomba dosificadora marca PULSATRON (dosificadora 2) que puede trabajar con una presión máxima de 80 psi, 5.6 bar y 50/60Hz.

Para bombear más fácilmente el aceite con las bombas dosificadoras, éste se colocó dentro de un recipiente de cristal de 1 L y se calentó con la ayuda de una parrilla de laboratorio para mantenerlo a una temperatura de 40 ± 2 °C. El mismo proceso de calentamiento se utilizó en todas las pruebas.

Como pudiera resultar obvio, al elevar la temperatura del aceite, éste experimenta una alteración de sus propiedades físicas, disminuyendo su viscosidad y densidad. El decremento de la viscosidad del aceite facilita su bombeo; sin embargo, la disminución de su densidad favorece la flotación y, por consiguiente, la separación de las gotas de aceite, lo cual se opone al objetivo de evaluar el desempeño del separador bajo ciertas condiciones operativas extremas.

El calentamiento, sería entonces, un procedimiento inaceptable, hasta que se pruebe que las gotas de aceite regresan a la temperatura del agua cuando entran en contacto con ella.

Para evaluar el comportamiento de las gotas, se calculó el tiempo que tarda una gota de aceite promedio en igualar la temperatura del agua del separador, con ello se puede analizar si las gotas de aceite ingresan al sistema con una temperatura similar a la del agua que las contiene. Dicho cálculo, que se presenta en el Anexo C, mostró que la gota promedio de 150 μm tarda sólo 0.078 s en enfriarse de 40 a 15°C. Las gotas más finas requieren un menor tiempo.

Estos resultados mostraron que el proceso de enfriamiento es casi instantáneo, y que las gotas de aceite ingresan al separador con una temperatura idéntica a la del agua. Por consiguiente se considera que el calentamiento del aceite no altera las condiciones de la prueba.

Se determinaron las equivalencias aproximadas que existen, entre las escalas de las bombas dosificadoras y el caudal de aceite que pueden surtir a la tubería principal del separador, cuando el sistema hidráulico del mismo está en operación (tubería bajo presión). Para ello se utilizó un método indirecto, el cual, junto con los resultados de la calibración, se presentan en el Anexo C.

Se tomaron muestras en el efluente de cada una de las corridas de evaluación de los sistemas de mezcla, para determinar las diferentes distribuciones del tamaño de partículas resultantes. Sobre estas bases se eligió el sistema que se emplearía definitivamente en el resto de las pruebas de evaluación del separador.

2.4.1.3. Determinación de la distribución del tamaño de partículas de aceite

Se recolectaron muestras de cada una de las mezclas aceite/agua producidas con alguno de los sistemas de mezcla mencionados previamente y se analizaron, instantes después de su generación, con el medidor de tamaño de partículas COULTER LS100 que se encuentra en el Laboratorio de Calidad del CIRA.

Para obtener muestras representativas fue necesario implementar un procedimiento de muestreo de transferencia al medidor, que permitiera que las muestras a analizar presentaran una distribución del tamaño de partículas de aceite idénticas a las de los influentes generados con cada uno de los sistemas de mezcla que se estudiaron.

El análisis del tamaño de partículas de aceite en aguas presenta varias dificultades relacionadas con:

1. La inestabilidad y movimiento ascendente y estratificación rápida de las gotas de la muestra.
2. La muestra debe transferirse y analizarse lo más rápidamente posible, porque sino el patrón de tamaño de las gotas se modifica muy rápidamente debido a la coalescencia que ocasiona el sistema de mezcla del medidor de tamaño de partículas.
3. La muestra debe contener un número de gotas suficiente para elevar la obscurecencia (parámetro operativo del medidor) por encima de 2 ó 3 %, sino el medidor no es capaz de determinar la distribución del tamaño de partículas.

El procedimiento desarrollado para contrarrestar las limitaciones consistió en lo siguiente.

Inicialmente se instaló el sistema de mezcla que se quería evaluar, se activó el sistema hidráulico del separador y se adicionó el aceite a través del sistema de inyección, dejando operar libremente los sistemas durante casi dos minutos hasta que se observó un funcionamiento global uniforme. Posteriormente, con la mezcla aceite/agua que se generó, se llenó un matraz de 1 L de capacidad. De este recipiente se transfirió una porción de aproximadamente 120 mL dentro de la celda de análisis del medidor de tamaño de partículas.

Para verter una muestra representativa de las partículas generadas dentro del medidor de tamaño de partículas, inmediatamente después de que se llenó el matraz, se introdujo dentro de este recipiente una manguera de 0.635 cm (¼ pulg) atada a una varita de acrílico. Previamente, se había generado una fuerza de succión al interior de

la manguera con una bomba de aire. Una vez que la varita con la manguera estaba dentro del matraz, ésta se movió rápidamente desde la superficie del agua hasta el fondo y después en forma ascendente, extrayendo y depositando una muestra uniforme de la mezcla aceite/agua dentro de la celda del medidor COULTER LS100.

Para cada uno de los sistemas de mezcla propuestos, este procedimiento se repitió un gran número de veces (5 a 10) con el fin de obtener un patrón promedio de distribución del tamaño de partículas representativo del sistema.

2.5. EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL ACEITE

2.5.1. Evaluación de la separación en columna batch

Las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Modelos Hidráulicos del C.I.R.A., utilizando una columna cilíndrica de acrílico de casi 1.20 m de altura y 0.20 m de diámetro. La columna de acrílico tiene 4 llaves ubicadas verticalmente a cada 20 cm, con la llave inferior situada a 6 cm del fondo.

La evaluación de la separación en columna batch sirvió para obtener los perfiles de concentración de aceite con respecto al tiempo de residencia y a la altura del separador.

Se utilizaron tres diferentes influentes reconstituidos, los cuales se generaron empleando el sistema hidráulico del separador piloto.

Los parámetros operativos de las pruebas batch se resumen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Parámetros operativos y características de las pruebas batch realizadas.

Prueba Batch No.	Sistema de mezcla agua/aceite	Caudal		Bomba dosificadora	Nivel de operación de la bomba	T _{agua} (°C)	T _{aceite} (°C)	Tipo de aceite
		L/min	L/s					
1	Dos mezcladores	7.5	0.13	Dosificadora No.1	10.0	12.0	12.0	SAE 15W-40 (multigrado)
2	Reducción de diámetro	14.56	0.24	Dosificadora No.1	5.0	9.5	40±2	HD SAE 60 (monogrado)
3	Reducción de diámetro	10.0	0.17	Dosificadora No.2	40%	17.0	40±2	HD SAE 60 (monogrado)

Para el primer ensayo se utilizó el sistema de mezcla agua/aceite que contiene dos mezcladores en línea, el cual se operó con un caudal de 7.5 L/min (0.13 L/s) y utilizó la bomba dosificadora No. 1 accionada a su máximo nivel (10.0).

Por otra parte, el segundo ensayo consideró el método que establece la instalación de un tubo para reducir el diámetro del conducto, con un gasto de 14.56 L/min (0.24 L/s) y adicionando el aceite con la bomba dosificadora No. 1 que operó a su nivel No. 5.

Para la tercera prueba se instaló el mismo sistema de mezcla que en el segundo ensayo, dosificando el aceite modelo con la bomba No.2 accionada al 100% de su capacidad,

con un caudal de agua de 10 L/min (0.17 L/s). Esta prueba representa, salvo la concentración de aceite, las mismas condiciones de evaluación del separador piloto.

Las diferentes condiciones de realización de las pruebas deberán percibirse en las características resultantes del agua residual reconstituida. Los parámetros que deberían influir en la distribución de tamaño de partículas son el tipo de aceite utilizado, el caudal empleado (número de Reynolds) y el tipo de mezclador. El tipo de dosificador deberá influir únicamente sobre la cantidad de aceite presente inicialmente en el agua.

El procedimiento de realización de las pruebas batch fue el siguiente:

1. Se llenó una cubeta con el agua residual reconstituida, luego la columna batch se llenó hasta la mitad, para posteriormente vaciar el contenido de la cubeta dentro de la columna provocando una homogeneización del líquido al inicio de la prueba.
2. Se tomaron muestras al tiempo cero para conocer la concentración inicial de aceite en el agua residual. Más tarde se tomaron muestras en cada llave de la columna a diferentes tiempos entre 1 y 60 minutos (en la primera prueba se tomaron muestras hasta 360 minutos).
3. En el caso de la prueba batch número 2, se tomaron también muestras a 0, 18, 32 y 48 minutos, y a 2 horas 25 minutos en la llave número 2 (numerada de abajo hacia arriba) cerca del fondo de la columna, para evaluar la evolución de la distribución del tamaño de partículas del aceite residual en el agua.

Para cada una de las 3 pruebas batch que se llevaron a cabo, se obtuvieron gráficas de Remoción vs Tiempo para cada una de las 4 alturas o niveles evaluados (Fall, 2000).

Las gráficas Remoción vs Tiempo se elaboraron calculando el porcentaje de remoción a cada altura i , para cada tiempo j :

$$R_{i,j}(\%) = \frac{G_0 - G_{ij}}{G_0}(100)$$

donde:

$R_{i,j}$	Porcentaje de remoción a cada altura i , para cada tiempo j
G_0	Concentración inicial de grasas y aceites, mg/L.
G_{ij}	Concentración de grasas y aceites a la altura i , al tiempo j , mg/L

Con los datos de las gráficas de Remoción vs Tiempo se construyeron las curvas de igual remoción (isorendimiento) en otra gráfica, conocida como gráfica de Rendimiento.

Con la gráfica de Rendimiento se obtuvo el rendimiento global para una profundidad semejante a la del separador piloto considerando diferentes tiempos de residencia.

El rendimiento global ($E\%$) se obtuvo con la ecuación siguiente, considerando una profundidad H de 40 y 55cm y distintos tiempos de residencia θ (Fall, 2000):

$$E(\%) = \frac{\Delta h_1}{H} \left[\frac{R_1 + R_2}{2} \right] + \frac{\Delta h_2}{H} \left[\frac{R_2 + R_3}{2} \right] + \frac{\Delta h_3}{H} \left[\frac{R_3 + R_4}{2} \right] + \frac{\Delta h_4}{H} \left[\frac{R_4 + R_5}{2} \right] + \dots$$

donde

- Δh_i Altura entre el primer par de curvas de isorendimiento evaluadas, cm
- R_i Porcentaje de rendimiento de la curva de igual remoción
- H Altura total a la cual se desea conocer la eficiencia global, cm

Con los distintos rendimientos globales calculados se construyó la gráfica de Rendimiento global vs Tiempo de residencia θ .

2.5.2. Evaluación de la eficiencia del separador piloto

2.5.2.1. Diseño experimental

La eficiencia del separador se determinó operando el separador piloto con el influente modelo seleccionado, probando diferentes configuraciones.

La evaluación del comportamiento del separador se realizó siguiendo el mismo plan estadístico que se utilizó para evaluar su desempeño hidrodinámico, es decir utilizando un plan de P.B. de 16 ensayos, con dos modalidades y 6 factores (Tablas 2.1 y 2.2). Las 6 variables operativas evaluadas fueron las mismas (tipo de vertedor de entrada, tipo de vertedor de salida, longitud y altura del separador, posición y % de penetración de la mampara de retención).

De la misma manera que en la evaluación hidrodinámica, se llevaron a cabo dos pruebas adicionales similares a la prueba No. 14, pero con diferentes vertedores de

entrada para determinar el beneficio de los vertedores no contemplados dentro del plan (vertedor rectangular múltiple y vertedor con tres orificios).

2.5.2.2. Procedimiento de realización de las corridas

Las pruebas se realizaron siguiendo el siguiente procedimiento: primero, se llenaron las tres cámaras del separador piloto con agua corriente de la llave. Una vez que el separador estaba completamente lleno, se inició la adición del influente modelo al interior del sistema, vertiéndolo dentro de la cámara inicial del separador.

La Figura 2.3 muestra un diagrama operativo global de las pruebas realizadas para evaluar la eficiencia del separador piloto.

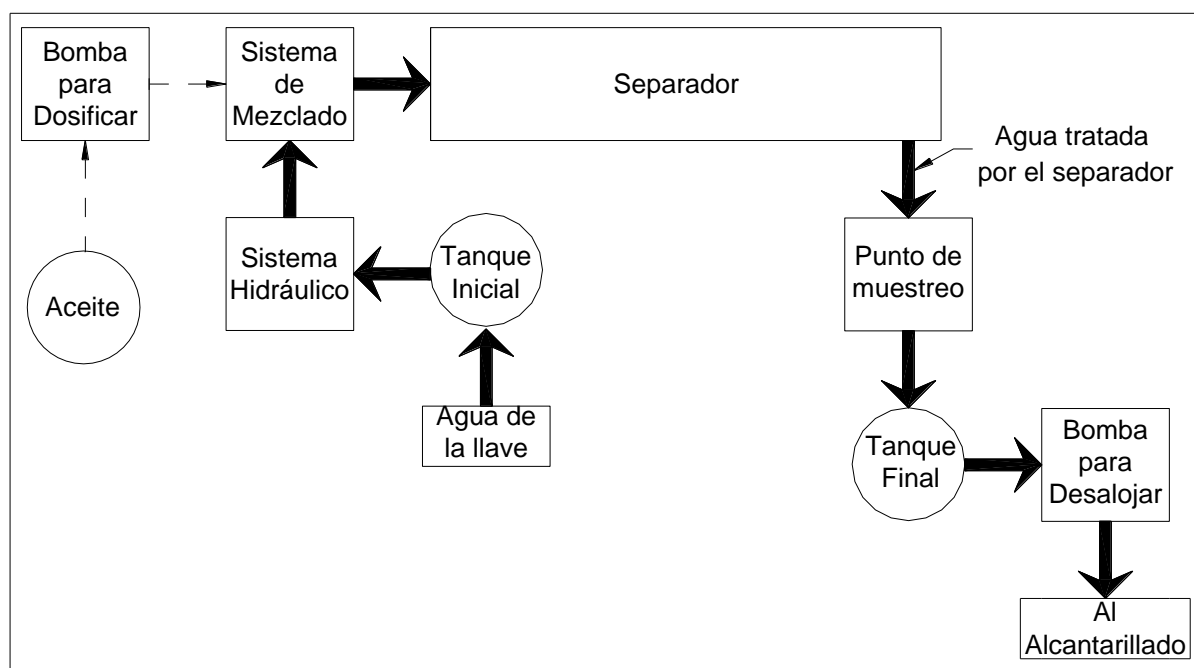


Fig. 2.3. Diagrama operativo del separador piloto para evaluar su eficiencia.

La eficiencia del separador para remover el aceite emulsificado, se determinó recolectando diversas muestras a la salida del separador a tiempos similares a tres veces el tiempo de residencia teórico del mismo, tiempo de residencia que dependió de la configuración de la prueba analizada. Así, se tomaron muestras a 1 hora 15 minutos, 1 hora 30 minutos ó 2 horas.

También se recolectaron muestras a la entrada del separador, con las cuales fue posible determinar la eficiencia para cada corrida. Con las eficiencias calculadas, las cuales se utilizaron como variable de respuesta, se determinó, aplicando un análisis de varianza,

la influencia de cada uno de los seis parámetros analizados y, por consiguiente, las variables operativas más importantes.

Se evaluó también el efecto del tiempo de residencia y de la carga hidráulica superficial sobre la eficiencia, así como también la correlación que existe entre el desempeño en la columna batch *vs* el desempeño del separador piloto.

2.5.3. Optimización del separador piloto

Una vez que se determinaron los parámetros operativos más importantes, tanto para la hidrodinámica como para la eficiencia del separador piloto, se eligió una configuración ideal.

La configuración ideal se eligió considerando los parámetros operacionales que más favorecieron la generación de un flujo pistón ideal y los parámetros que tuvieron una mayor influencia en la obtención de una eficiencia elevada para remover el aceite del influente modelo.

Con base en lo anterior, se configuró el separador según la combinación básica óptima y se volvió a evaluar su desempeño, montando los mejores vertedores de entrada y de salida, eligiendo la longitud y profundidad del separador piloto más benéfica y, la posición y porcentaje de penetración de la mampara de retención más favorable.

Se debe notar que la configuración óptima no se evaluó como tal en las corridas del plan factorial anterior, porque no estaba contemplada dentro de él.

Además agregaron dos accesorios extra a la configuración óptima básica, para evaluar algún beneficio adicional que pudieran aportar.

El primer accesorio consistió en introducir una placa de acrílico sumergida (altura de 35 cm) para dividir la cámara de separación en dos. El segundo accesorio fue un pequeño módulo de placas paralelas que se instaló casi a la salida poco antes de la mampara de retención.

La Figura 2.4 ilustra la configuración óptima del separador piloto y los accesorios adicionales que se evaluaron.

El modelo con placas paralelas se construyó con 6 placas de acrílico de 30 cm de ancho que se montaron con tuercas sobre un par de guías con cuerda. Las placas se colocaron dejando un espacio entre ellas de 2.5 cm.

El plan experimental utilizado para la optimización se muestra en la Tabla 2.5 y está conformado por 4 corridas.

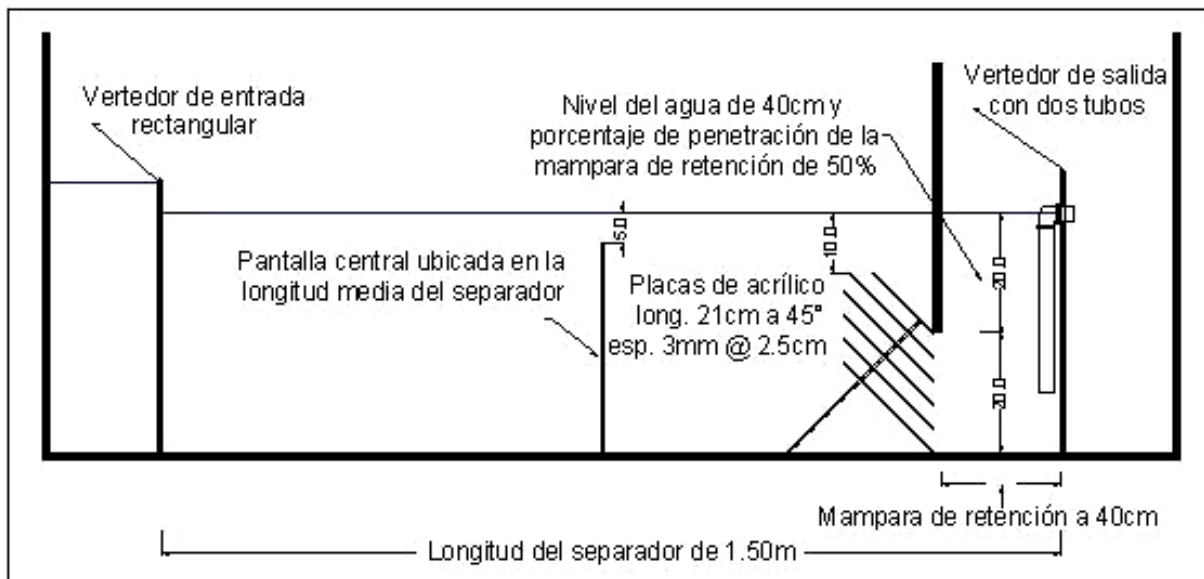


Fig. 2.4. Configuración óptima básica del separador piloto y accesorios adicionales.

Tabla 2.5. Plan experimental final para optimizar el separador piloto.

Corrida No.	Configuración del separador	Combinación	
		Mampara divisoria	Placas paralelas
1	Óptima básica sin accesorios	-1	-1
2	Óptima básica con placa divisoria	+1	-1
3	Óptima básica con placas paralelas	-1	+1
4	Óptima básica con placas paralelas y placa divisoria	+1	+1

El plan de la Tabla 2.5 es un plan factorial completo que evalúa todas las combinaciones posibles entre mampara divisoria y placas paralelas (-1,-1; +1,-1; -1,+1; +1,+1), utilizando en todas las corridas la configuración óptima básica.

Las cuatro configuraciones finales se sometieron a un análisis del tiempo medio de residencia y a una evaluación de su eficiencia para remover aceite.

Las pruebas hidrodinámicas finales se realizaron siguiendo un procedimiento similar al utilizado con las pruebas hidráulicas precedentes, pero con el caudal de 10 L/min (0.17L/s). Para ello, se utilizó la bomba dosificadora No. 2 al 40 % de su capacidad para inyectar un trazador con una concentración de 32 g/L de cloruro de sodio en la tubería del influente.

La eficiencia para remover el aceite de las últimas cuatro configuraciones se calculó, utilizando el influente modelo, siguiendo el mismo procedimiento que se aplicó durante la etapa de evaluación de la eficiencia del separador piloto.

Las muestras de las cuatro pruebas finales se recolectaron una hora con 30 minutos después de que el sistema se había puesto en funcionamiento, es decir, las muestras se tomaron a un intervalo de tiempo superior a tres veces el tiempo de residencia nominal del sistema. Estas muestras se recolectaron a la salida del separador piloto.

Para completar el análisis de la eficiencia se tomaron algunas muestras del influente.

Además de las muestras antes mencionadas, se recolectó una muestra del influente modelo, la cual se sometió a la prueba de susceptibilidad de separación.

2.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS

El principal parámetro químico que se analizó en el presente proyecto fue el de grasas y aceites. Para ello, se empleó el método 5520 E (APHA, 1989), el cual se basa en la determinación de la concentración de grasas y aceites presentes en una muestra de agua mediante el método de extracción de Soxhlet, y de su cuantificación por gravimetría.

Además del parámetro anterior, también se analizó, en algunas muestras recolectadas en los talleres, el pH, la concentración de sólidos suspendidos totales (SST), la conductividad y la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Para calcular el pH y la conductividad de las muestras se empleó un medidor electroquímico portátil marca CIBA-CORNING modelo M90.

La DQO se determinó siguiendo el método 5220 B de reflujo abierto (APHA, 1989).

Las concentraciones de SST se determinaron siguiendo el método 2540 D (APHA, 1989).

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	66
3.1. TRABAJO DE CAMPO: VISITA A LOS TALLERES Y EVALUACIÓN DE LOS SEPARADORES EXISTENTES	66
3.1.1. <i>Descripción de los talleres visitados</i>	66
3.1.2. <i>Análisis de la eficiencia de operación de los separadores</i>	68
3.1.3. <i>Determinación de los caudales de operación de los talleres</i>	67
3.1.4. <i>Características base de las aguas</i>	72
3.1.4.1. <i>Características base de las aguas residuales</i>	72
3.1.4.2. <i>Características base de los aceites nuevos y usados</i>	75
3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEPARADOR PILOTO.....	78
3.3. EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DEL SEPARADOR PILOTO.....	83
3.4. PRUEBAS PRELIMINARES A LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SEPARADOR PILOTO	89
3.4.1. <i>Selección del aceite modelo</i>	89
3.4.2. <i>Selección del sistema de mezcla aceite/agua</i>	89
3.5. EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL ACEITE	94
3.5.1. <i>Evaluación de la separación en columna batch</i>	94
3.5.2. <i>Evaluación de la eficiencia del separador piloto</i>	101
3.5.3. <i>Optimización del separador piloto</i>	109
3.5.4. <i>Consideraciones generales para instalar el separador piloto en campo</i>	117

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. TRABAJO DE CAMPO: VISITA A LOS TALLERES Y EVALUACIÓN DE LOS SEPARADORES EXISTENTES

3.1.1. Descripción de los talleres visitados

En total se analizaron 18 talleres, las características de ellos se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Descripción de los talleres evaluados.

No.	Clave Interna	Actividad Principal	Descripción de sus actividades
1	A609	Lavado y engrasado de autos, camionetas y camiones pequeños (3.5ton)	Lavado de carrocerías. Lavado y engrasado de motor y/o chasis. Limpieza de interiores. Cambio de aceite de motor, diferencial y transmisiones y de fluidos para frenos y embragues. Cuentan con un área especial para cada actividad. En la mayoría de los casos el área de lavado y engrasado no está cubierta. Tienen en promedio 2 ó 3 tomas de agua para el lavado y engrasado y un número similar para el lavado de las carrocerías.
2	A628		
3	A629		
4	A630		
5	A632		
6	A616	Lavado y engrasado de todo tipo de vehículos (autos, camionetas, camiones, autobuses y tractocamiones)	Emplean sistemas hidráulicos y cubetas para lavar los vehículos. No todos cuentan con separadores de grasas y aceites funcionales. Utilizan distintos tipos de limpiadores y/o detergentes y/o diesel y/o desengrasantes y/o mezclas de ellos.
7	A706		
8	A606	Lavado de carrocería de autos, camionetas y camiones pequeños (3.5ton)	Sólo lavado de carrocerías y limpieza de interiores. No están techados. Tienen en promedio de 4 a 8 tomas de agua. Emplean sistemas hidráulicos y/o cubetas para lavar los vehículos. No cuentan con separadores de grasas y aceites funcionales. Utilizan distintos tipos de limpiadores (detergentes en polvo y shampoo).
9	A614		
10	A624		
11	A950	Lavado de autobuses	
12	A642	Lavado de autos en concesionaria	Lavan las carrocerías de los vehículos para su exhibición y venta o después de un servicio. Realizan actividades de lavado y engrasado de motor y/o chasis en pequeña escala. No es la actividad primordial del establecimiento. Tienen generalmente separadores de grasas y aceites funcionales.
13	A663		
14	A999		
15	A640	Reparación de radiadores	Reparan fugas de los radiadores y en un tanque de pruebas evalúan su hermeticidad. Los tamaños de los tanques son variables. Utilizan distintos materiales para soldar. Manejan anticongelantes.
16	A641		
17	A964		
18	A626	Reparación de camiones diesel	Sólo reparación de partes mecánicas. Áreas de labor parcialmente techadas. No tiene separador de grasas.

En la Tabla 3.1 se agruparon los talleres de acuerdo con la actividad principal que realizan, especificando el tipo de vehículos que atienden y sus actividades secundarias que giran en torno a la actividad principal.

Los números de la primera columna sólo indican el número de fila de la tabla. La clave interna es el número de registro del taller dentro de la auditoría ambiental que se llevó a cabo en la Ciudad de Toluca y se utilizará para identificar a los talleres.

En la Tabla 3.1 se puede observar que los siete primeros talleres son muy completos, ya que realizan una gran cantidad de labores enfocadas a la limpieza y el mantenimiento automotriz. En total, cada uno de ellos puede atender en promedio, simultáneamente, a un máximo de 5 ó 6 vehículos, distribuidos en sus diferentes secciones de trabajo.

Los talleres que se encuentran en la Tabla 3.1 de la fila 8 a la 11 se dedican exclusivamente al lavado de carrocerías. No cuentan con la infraestructura necesaria para llevar a cabo labores de lavado y engrasado de motor y chasis.

En las filas 12, 13 y 14 se presentan tres talleres de lavado que pertenecen a tres diferentes agencias automotrices. Como es lógico, realizan el lavado de los vehículos como un trabajo complementario a las actividades principales de estos centros (venta de autos, reparación de sistemas eléctricos y mecánicos, hojalatería, pintura, etc.).

Los talleres que se dedican a la reparación de radiadores (filas 15, 16 y 17) emplean tanques de almacenamiento de pequeñas dimensiones en los cuales se evalúa la hermeticidad de los radiadores. Estos sitios descargan sus aguas residuales directamente al alcantarillado municipal. La descarga total del tanque, según los empleados, se realiza en promedio cada semana.

Finalmente, se analizaron las labores de un taller dedicado a la reparación y mantenimiento de partes mecánicas de autobuses. Una fracción de la superficie de labor del taller está completamente techada y cuenta con una plancha de concreto sobre la cual laboran los empleados. Esta sección de trabajo, según los responsables de su administración, se lava periódicamente con agua y jabón (1 vez por semana). Sus aguas residuales (lavado de pisos y escurrimientos pluviales) se captan con registros sanitarios y se evacuan al alcantarillado municipal.

En el presente estudio no se consideró el análisis de servicios de lavado automáticos porque no existe un número considerable de ellos en la Ciudad de Toluca, y la

demanda la cubren, principalmente, establecimientos similares a los que se analizan en este trabajo.

3.1.2. Análisis de la eficiencia de operación de los separadores

La eficiencia de operación de los separadores de los talleres visitados se determinó analizando, principalmente, la concentración de grasas y aceites que contenían las muestras que se recolectaron antes y después de los separadores, cuando éstos existen, o analizando los influentes acumulados en los registros y evaluando, más tarde, la susceptibilidad de separación.

La Tabla 3.2 muestra los resultados de diversas muestras de aguas residuales que se recolectaron en 9 de los 18 talleres evaluados.

Tabla 3.2. Evaluación de los separadores existentes en los talleres de la Ciudad de Toluca.

N°	Clave Interna del taller	Tipo de taller	N° Muestra	Punto de Muestreo	Parámetros					Observaciones
					SST (mg/L)	Conductividad (µS/cm)	pH	DQO (mg/L)	[GyA] (mg/L)	
1	A630	Lavado y engrasado	1	Entrada del separador	-	-	-	897.0	1063.1	- Separador de grasas y aceites de 2.1 x 1m de superficie, diseño funcional - El efluente cumple la normatividad - Desengrasantes "Capitan" y diesel, shampoo "Now Ultra Clean", detergente "Axion".
			2	Salida separador (1)	144.0	-	-	237.5	104.0	
			3	Salida separador (2)	-	-	-	-	70.1	
			4	Muestra (1) susceptibilidad	-	-	-	354.0	61.5	
2	A706	Lavado y engrasado	5	Salida separador	-	224.0	6.6	147.5	51.0	- Separador de grasas y aceites de 3.5 x 2m de superficie, diseño funcional - El efluente cumple la normatividad - Desengrasantes "FD50Capitan", shampoo del mismo proveedor que el desengrasante.
3	A642	Lavado y engrasado de concesionaria	6	Salida separador	-	500.0	6.7	675.0	88.9	- Separador de grasas y aceites de 3.5 x 2.5m de superficie, diseño funcional - El efluente cumple la normatividad - Desengrasantes "Remobel II" y "Limkaw 2", shampoo "Deternet Plus"
4	A663	Lavado y engrasado de concesionaria	7	Salida separador (tanque)	113.3	500.0	7.0	430.0	1.4	- No tiene separador. - Tratan sus aguas en un tanque de almacenamiento. - El efluente cumple la normatividad
5	A628	Lavado y engrasado	8	Entrada del separador	728.0	-	-	-	648.4	- Separador de grasas y aceites de 3 x 1m de superficie, diseño funcional - El efluente no cumple la normatividad - Desengrasantes "Bactium" y diesel. - Aguas blanquecinas muy emulsificadas
			9	Salida separador	44.0	-	-	-	332.9	
			10	Muestra 9 a susceptibilidad	-	-	-	-	416.6	
6	A632	Lavado y engrasado	11	Salida separador	316.0	-	-	1223.0	460.7	- Separador de grasas y aceites de 3.7 x 1m de superficie, diseño funcional - El efluente no cumple la normatividad - Desengrasantes "Bactium" y diesel. - Aguas blanquecinas muy emulsificadas

Tabla 3.2 (continuación). Evaluación de los separadores existentes en los talleres de la Ciudad de Toluca.

N°	Clave Interna del taller	Tipo de taller	N° Muestra	Punto de Muestreo	Parámetros					Observaciones
					SST (mg/L)	Conductividad (µS/cm)	pH	DQO (mg/L)	[GyA] (mg/L)	
7	A609	Lavado y engrasado	13	Entrada del separador	-	-	6.7	7814.0	456.4	<ul style="list-style-type: none"> - Separador de grasas y aceites de 2.1 x 0.70m de superficie, diseño funcional mal configurado - DQO del efluente muy alto - Desengrasantes “Galleon” y diesel, jabón “Roma” - Aguas blanquecinas muy emulsificadas. - Se perdió la muestra final de la salida del separador, no se pudo confirmar si respeta o no la normatividad
			14	Salida separador	-	-	-	3246.5	-	
8	A629	Lavado y engrasado	15	Entrada al registro (#1)	642.0	-	6.8	547.0	185.8	<ul style="list-style-type: none"> - No tiene separador, sólo registros para descargar las aguas residuales - Desengrasante: “Practic” y diesel - La descarga no cumple con la normatividad y su tratamiento directo no es factible con un separador por el grado de emulsión
			16	Entrada al registro (#2)	612.0	-	6.9	533.0	-	
				Muestra (#1) susceptibilidad	-	-	-	-	115.6	
				Muestra (#2) susceptibilidad	-	-	-	-	337.5	
9	A626	Taller de reparación de autobuses	17	Agua estancada en el registro	-	-	-	1826.2	414.1	<ul style="list-style-type: none"> - No tiene separador, sólo registros para descargar las aguas residuales - Aguas residuales producto de escurrimientos, lavado de pisos, arrastre de derrames y fugas de aceites. - La descarga no cumple la normatividad, pero su tratamiento directo es factible con un separador convencional
			18	Muestra a susceptibilidad	-	-	-	-	69.5	

Todos los talleres evaluados (excepto el último que es un taller de reparación de autobuses) son servicios de lavado y engrasado, considerados como el tipo de taller más contaminante. Los 7 primeros talleres disponen de un separador con un diseño funcional (el taller A663 tiene un tanque batch), mientras que los dos últimos sólo tienen registros de descargas y no tratan sus aguas.

A continuación se analizan con más detalle la situación de los diferentes talleres.

Con base en la Tabla 3.2 se pudo constatar que:

1. Sólo los cuatro primeros talleres (A630, A706, A642 y A663) cuentan con la infraestructura adecuada para cumplir con la función de separar el aceite del agua. Sin embargo, se debe constatar que sus separadores tienen un tamaño muy variable y ocupan un espacio aparentemente muy grande (entre 2 y 8.75m²).
2. Se puede considerar que la concentración de aceite en el efluente del taller A630 respeta la norma NOM-002-ECOL-1996 con 70.1 y 104 mg/L (apenas rebasó el límite la segunda muestra). La prueba de susceptibilidad de separación confirmó la factibilidad de poder separar, de manera adecuada, el aceite del efluente de este taller, mostrando que el tipo de desengrasante utilizado no genera una emulsión significativa.
3. De los talleres A642 y A663 (tercera y cuarta línea) no se tienen datos de las características de las aguas residuales antes del separador; sin embargo, la concentración de grasas y aceites de sus aguas tratadas (muestras 6 y 7) se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles. Estos talleres son subáreas de operación de agencias automotrices. La actividad que realizan no es la actividad primordial del establecimiento y por ello producen una cantidad muy baja de aguas residuales de lavado y engrasado, lo que permite que el taller A663 trate sus aguas en un tanque *batch*, al almacenar sus aguas durante un cierto periodo de tiempo se favorece la flotación de las gotas de aceite. El taller A663 descarga sus aguas tratadas por la parte baja del tanque *batch*. El separador del taller A642 tiene un buen desempeño, pero es muy grande. Como sus separadores respetan la norma, se considera que sus desengrasantes no forman una emulsión significativa.
4. Los efluentes de los talleres A628 y A632 (quinta y sexta fila) no cumplen con los límites que establece la normatividad. Tienen separadores con un diseño funcional, pero sus aguas presentan un color blanquecino que indica una alta emulsificación. La prueba de susceptibilidad del efluente del taller

del A628 confirma la hipótesis de las emulsiones (contienen una gran proporción de aceites emulsificados de casi 65%). Los talleres A628 y A632 usan el mismo desengrasante (“Bactium”), además, a pesar de que cuentan con separadores grandes con un diseño funcional, no cumplen con los límites máximos permisibles. El separador del taller A609 cumple con los requisitos mínimos de tal proceso, pero está mal configurado, lo que aunado a la emulsificación (aguas blanquecinas) hace pensar que su efluente aparentemente no respeta la norma, pero no se tienen los elementos suficientes y necesarios para confirmarlo o rechazarlo.

5. Un alto porcentaje de los talleres de la Ciudad de Toluca no cuentan con un separador de grasas y aceites. Los talleres de lavado y engrasado son los que más cumplen con la instalación de un separador. Aún así, existen todavía varios, como los de los talleres A629 y A626, que no cuentan con este elemento. Es frecuente encontrar en estos lugares algunos “arreglos” con los que buscan simular el papel de los separadores. Estos arreglos, semejantes a los que se muestran en la Figura 3.1, son simplemente registros sanitarios que no pueden cumplir con la función de separar el aceite del agua, por lo que la remoción de las sustancias oleosas no existe, descargando directamente sus aguas sin algún pretratamiento al alcantarillado. Esta última es la situación que prevalece, generalmente, en todo tipo de talleres (talleres de lavado de carrocerías, de reparación de motores, cambio de aceite, corralones de autobuses y camiones, deshuesaderos, etc.). Las aguas del taller A629 tienen una alta fracción de aceites emulsificados, por lo que sus aguas no pueden tratarse con un separador convencional, siendo necesario que utilicen otro tipo de desengrasante. Por el contrario, las aguas del taller A626 tienen pocos aceites emulsificados porque no usan desengrasantes. El agua residual de este establecimiento proviene del lavado de pisos, escurrimientos pluviales y del agua que cae sobre los amontonamientos de las piezas mecánicas usadas. Sus aguas pueden tratarse con un separador y es muy factible que cumplan con la norma.
6. Los datos relativos a SST, conductividad, DQO y pH, se discutirán en la sección 3.1.3 (características de las aguas residuales de los talleres).

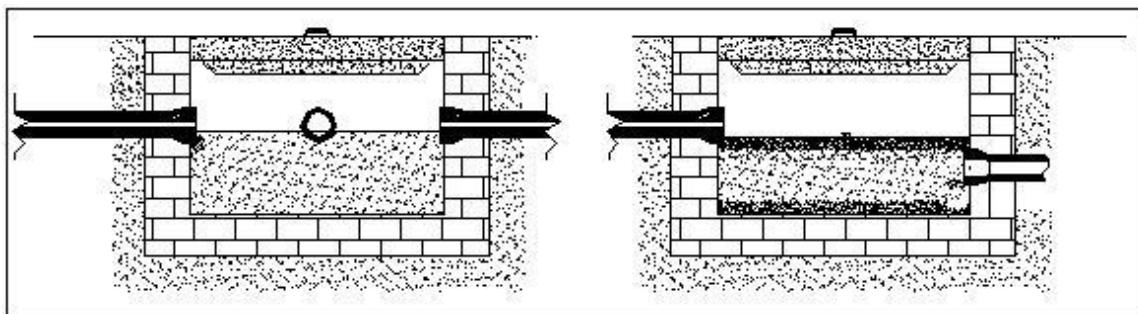


Fig. 3.1. Arreglo hidráulico encontrado en la mayoría de los talleres de Toluca: simples registros sanitarios.

3.1.3. Determinación de los caudales de operación de los talleres

En los talleres de lavado y engrasado, que es donde se generan los mayores volúmenes de aguas residuales, se pudo constatar que existen tres variantes en la manera de operar en cuanto al método que emplean para surtir el agua para lavar los vehículos. Éstos son, básicamente:

- a) Utilización de pistolas o boquillas
- b) Utilización de cubetas para arrojar el agua (cubetazos)
- c) Marco viajero con perforaciones (caso particular encontrado en uno de los talleres)

Durante la visita a los talleres evaluados, se pudo determinar el caudal que producen las pistolas que se emplean en estos lugares para lavar los vehículos. La Tabla 3.3 muestra diferentes datos operativos y caudales de estas pistolas.

Tabla 3.3. Datos operativos y caudales de pistolas propulsoras.

No.	Clave interna del taller	Sistema hidráulico y tipo de pistola propulsora	Caudal (L/min)
1	A609	Bomba tipo pistón antigua + pistola	5.3
		Bomba móvil + pistola	9.6
2	A999	Bomba móvil	16.0
3	A606	Bomba tipo pistón + boquilla	6.0
4	A628	Bomba tipo pistón + pistola	7.7
5	A630	Bomba centrífuga + boquilla(#1)	24.0
		Bomba centrífuga + boquilla(#2)	36.0
		Bomba centrífuga + boquilla(#3)	15.0
6	A629	Bomba tipo pistón + pistola	8.0
		Bomba centrífuga + marco viajero perforado	13.5
7	A616	Bomba tipo pistón + pistola (#1)	15.0
		Bomba tipo pistón + pistola (#2)	15.0
		Bomba tipo pistón + pistola (#3)	15.0
Rango:			5.3-36.0

Con base en la Tabla 3.3 se puede establecer que el gasto mínimo que descargan los sistemas hidráulicos de lavado de los talleres de lavado y engrasado es de 5.3 L/min (0.09 L/s), y el máximo de 36.0 L/min (0.60 L/s).

La mayor parte de los sistemas de lavado generan un caudal inferior a 15 o 16 L/min (0.25 ó 0.27 L/s), con excepción de dos pistolas del taller A630 que generan un gasto de 24 y 36 L/min (0.40 y 0.60 L/s).

La Tabla 3.4 presenta el volumen de agua que se requiere para lavar las carrocerías de distintos vehículos, el sistema de lavado que emplean, el tiempo que tardan en hacerlo y el caudal promedio que utilizan en función de la duración.

Tabla 3.4. Volumen de agua requerido para lavar la carrocería de diversos vehículos.

Clave interna	Sistema de lavado	Volumen (L/auto)	Duración* promedio de lavado (min)	Caudal** promedio		Observaciones
				L/min	L/s	
Autos chicos						
A606	Bomba centrífuga+manguera+boquilla	34.0	25	1.4	-	Promedio en taller de lavado sin engrasado
A614	Bomba centrífuga+manguera+boquilla	35.0	20	1.8	-	
A609	Bomba móvil+pistola	60.0	25	2.4	-	Chevrolet Eurosport
A630	Bomba centrífuga +boquilla	41.0	20	2.1	-	Tsuru
A630	Bomba centrífuga +boquilla	69.0	-	-	-	Spirit
Promedios		47.8	22.5	2.5	0.04	
Camionetas						
A616	Cubetazos+Pistola	230.0	32	7.2	-	Ford F150
A628	Cubetazos con recipientes de 8L	176.0	28	6.3	-	Suburban 2500
A706	Cubetazos con recipientes de 4L	100.0	30	3.3	-	Ford F100
Promedios		168.7	30.0	5.6	0.09	
Autobuses						
A950	Cubetas	96.0	30	3.2	-	Estos establecimientos compran el agua en pipas
A624	Cubetas	90.0	36	2.5	-	
Promedios		93.0	33.0	2.8	0.05	

*. El tiempo incluye los periodos de aplicación de limpiadores, tallado y enjuagado; no incluye el secado ni la limpieza de interiores, éstos se hacen en otra área.

**.. Volumen/Duración: Es un caudal igualado, para calcular el volumen se consideró solamente el tiempo de operación del sistema hidráulico.

Los dos primeros y los dos últimos talleres solamente se dedican al lavado de carrocerías, los demás cuentan con el equipo suficiente para lavar y engrasar los vehículos. Se puede ver que se utiliza menos agua en los talleres dedicados exclusivamente a lavar las carrocerías.

Para lavar la carrocería de un auto se necesitan, en promedio, casi 50 L durante poco más de 20 min, contra aproximadamente 170 L y 30 min para las camionetas.

Los autobuses son vehículos más grandes que las camionetas; sin embargo, los talleres A950 y A624 ocupan menos agua en lavar la carrocería de un autobús (93 L, tiempo medio de 33 min) que los talleres A616, A628 y A706 en lavar la carrocería de una camioneta (168.7 L durante 30 minutos), a pesar de que los primeros lavan los autobuses a cubetazos. Lo anterior se debe principalmente a que en estos talleres se siguen ciertas medidas para economizar el agua, debido a que no cuentan con un

abastecimiento constante de este líquido, por lo que tienen que comprarlo. No fue posible obtener el permiso de un taller de lavado y engrasado para evaluar el volumen de agua que se necesita para lavar las carrocerías de los autobuses en este tipo de negocios, se estima que el consumo será mucho mayor que el que se utiliza en los lavados simples de autobuses con cubetazos.

Se debe poner especial atención en que el volumen de agua requerido para lavar cierto vehículo se incrementa sustancialmente cuando se realiza, parcial o totalmente, con cubetazos (aventando el agua con ciertos recipientes), alcanzando, en algunos casos, hasta los 230 L. El caso de los autobuses de la Tabla 3.4 no debe considerarse dentro de este rubro, porque para ellos el agua es muy costosa.

La Tabla 3.5 presenta el volumen de agua que se requiere para lavar y engrasar el motor y chasis de distintos vehículos y lavar sus carrocerías (servicio completo), su sistema de lavado, el tiempo que tardan en hacerlo y el caudal promedio igualado.

Tabla 3.5. Volumen de agua requerido para el lavado y engrasado de diversos vehículos.

Clave interna del taller	Sistema de lavado	Volumen (L/auto)	Duración* promedio de lavado (min)	Caudal promedio**		Observaciones
				L/min	L/s	
Autos chicos						
A016	Bomba pistón+pistola	180.0	-	-		Chrysler Cirrus
A016	Bomba pistón+pistola	217.0	49.0	4.4		Tsuru, con cubetazos
A009	Bomba móvil+pistola	208.0	95.0	2.2		Servicio Completo Hundai Sonata
A030	Bomba centrífuga+boquilla	193.0	55.0	3.5		Servicio Completo Spirit
A030	Bomba centrífuga+boquilla	165.0	49.0	3.4		Servicio Completo Tsuru
	Promedios	188.7	66.3	2.8	0.05	
Camionetas						
A009	Pistola+bomba móvil	282.0	113.0	2.5		Ford Pick Up 250
A009	Pistola+bomba pistón	279.0	-	-		Chevrolet Suburban
A106	Bomba pistón+boquilla+cubetazos p/carrocería	388.0	70.0	5.5		Ford F100
A028	Bomba pistón+pistola+cubetazos p/carrocería	269.0	81.0	3.3		Chevrolet Suburban 2500
	Promedios	304.5	88.0	3.8	0.06	
Camión 10 ton						
A009	Bomba móvil+pistola	617.0	150.0	4.1	0.07	
Tractocamión						
A016	Bomba pistón	1100	210.0	5.2	0.09	Tractocamión con remolque tipo "cama baja"

*. El tiempo incluye los periodos de aplicación de limpiadores, tallado y enjuagado; no incluye el secado ni la limpieza de interiores, éstos se hacen en otra área.

**. Volumen/Duración: Es un caudal igualado, para el volumen se considera solamente el tiempo de operación del sistema hidráulico.

La Tabla 3.5 establece que se necesitan, en promedio, casi 190 L de agua para darle “servicio completo” de lavado y engrasado a un auto chico. Este proceso dura aproximadamente poco más de 1 hora. Para una camioneta se necesitan poco más de 300 L en un intervalo de 88 min. Durante el lavado de un camión de 10 ton se registró el uso de más de 600 L en un periodo de 1 hora 30 min y, para un tractocamión con remolque tipo cama baja, son necesarios más de 1000 L de agua y 3 horas y media de trabajo.

Sin embargo, en la Tabla 3.5 se nota que en todos los casos el gasto promedio igualado de los “servicios completos” oscila entre 2.8 y 5.2 L/min por auto (0.05 y 0.09 L/s), el cual es un valor muy similar al caudal promedio que se genera por el lavado de las carrocerías (2.5 a 5.6 L/min por auto, 0.04 y 0.09 L/s, respectivamente).

Los gastos promedios se determinaron considerando el caudal que pueden generar los sistemas de lavado, y el tiempo que dura el proceso de lavado de los vehículos. Incluyendo también los tiempos en los que no se utiliza agua.

Debido a que el proceso de lavado involucra enjabonar, tallar y enjuagar, el tiempo que permanece activado el sistema hidráulico de lavado es muy irregular (poco continuo), ya que las actividades antes mencionadas se realizan sin seguir un orden establecido, y la duración de cada una de ellas depende de qué tan sucios se encuentren los vehículos.

Finalmente, en la Tabla 3.6 se presentan los volúmenes de aguas utilizados en los talleres de radiadores. Como se recuerda, estos sitios cuentan con tanques de distintos tamaños en los que se evalúa la hermeticidad de los sistemas de enfriamiento de los vehículos. En esta tabla también se presentan las dimensiones de los tanques de los tres talleres de radiadores evaluados.

Tabla 3.6. Volumen de los tanques de prueba de los talleres de radiadores.

Clave interna del taller	Dimensiones del tanque de pruebas	Volumen (L)
A640	1.2 x 1.2 x 0.15 m	216
A641	1.5 x 1.0 x 0.1 m	150
A964	2.5 x 2.0 x 0.5 m	2500

Se puede ver que los dos primeros tanques no usan un gran volumen de agua (150 y 216 L por semana), equivalente al que se ocupa para lavar y engrasar un auto chico; sin embargo, el tanque del tercer taller es de 2500 L. Si se considera el volumen de los tanques de los dos primeros talleres (A640 y A641), se puede pensar que éstos no

generan un volumen de aguas residuales considerable. Sin embargo, el tercero podría generar un volumen de aguas que debería atenderse, sobre todo si se toma en cuenta la calidad de los efluentes desde el punto de vista estrictamente reglamentario (posiblemente pudieran clasificarse como residuos peligrosos).

Debe tomarse muy en cuenta que en estos sitios las aguas se desechan cuando adquieren un color obscuro muy elevado (según comentarios de personas relacionadas con estos servicios). Con base en lo anterior y considerando que el tanque de 2500 L es más de 10 veces superior en volumen a los otros dos tanques, se podría deducir que, tarda más en ensuciarse, pero tiene mayores posibilidades de producir malos olores.

Con lo anterior no se pretende pasar por alto el volumen de 2500 L que descarga el taller A964, sino considerar que este volumen se descarga más esporádicamente que los volúmenes de los otros talleres.

De esta manera se observa que no son volúmenes de aguas residuales considerables, sobre todo comparados contra las cantidades que generan los talleres de lavado y engrasado. Pero, como se mencionó previamente, desde el punto de vista normativo su calidad (la cual se analizará en la siguiente sección) podría caracterizar a este tipo de aguas como residuo peligroso, con todo lo que origina este término, haciendo de la gestión de estas aguas un dilema debido a la falta de recursos que tienen estos talleres. Lo anterior compete a las autoridades y podría resolverse a través de políticas excluyentes para pequeños generadores o mediante la gestión agrupada a cargo de los mismos establecimientos.

Lo anterior no es exclusivo de los desechos de los talleres de radiadores, la generación de residuos peligrosos se expande a varios tipos de talleres automotrices (Fall *et al.*, 1999; W.E.F., 1995; M. P. C. A., 1998).

3.1.4. Características base de las aguas

3.1.4.1. Características base de las aguas residuales

Las características base de las aguas residuales de los talleres de lavado y engrasado y talleres de autobuses, se determinaron considerando las muestras que se recolectaron a la entrada de los separadores evaluados o, en su defecto, poco antes del punto de descarga al alcantarillado.

Las muestras recolectadas en los talleres de radiadores se tomaron directamente de los tanques de prueba de estos sitios.

La Tabla 3.7 muestra las características de las aguas residuales que producen algunos de los talleres evaluados. En ella es posible observar, además de la concentración de grasas y aceites, algunos otros parámetros químicos, como DQO, SST, pH y conductividad, que ayudan a describir la naturaleza de estas aguas. También, dicha tabla, contiene los resultados de las pruebas de susceptibilidad realizadas en algunas muestras para evaluar su tratabilidad mediante un separador convencional.

Tabla 3.7. Características base de las aguas residuales generadas por los talleres.

Clave interna del taller	Tipo de taller	No. de muestra	Punto de Muestreo	Parámetros				
				SST (mg/L)	Conductividad* (μS/cm)	pH	DQO (mg/L)	[GyA] (mg/L)
A630	Lavado y engrasado	1	Entrada del separador	-	-	-	897.0	1063**
		4	Prueba de susceptibilidad	-	-	-	354.0	61.5
A628	Lavado y engrasado	8	Entrada del Separador	728.0	-	-	-	648.4
		10	Prueba de susceptibilidad	-	-	-	-	416.6
A609	Lavado y engrasado	13	Entrada del Separador	-	-	6.7	7814.0	456.4
A629	Lavado y engrasado	15	Entrada al registro (#1)	642.0	-	6.8	547.0	185.8
		16	Entrada al registro (#2)	612.0	-	6.9	533.0	-
		-	Prueba de susceptibilidad (#1)	-	-	-	-	115.6
		-	Prueba de susceptibilidad (#2)	-	-	-	-	337.5
A626	Reparación de autobuses	13	Agua estancada en el registro	-	-	-	1826.2	414.1
		14	Prueba de susceptibilidad	-	-	-	-	69.5
A640	Reparación de radiadores	16	Tanque de pruebas de los radiadores	2332.0	2340.0	6.8	957.8	166.3
A641	Reparación de radiadores	17	Tanque de pruebas de los radiadores	1200.0	858.0	6.4	1303.0	184.9
A964	Reparación de radiadores	18	Tanque de pruebas de los radiadores	260.0	6980.0	5.3	1198.5	40.4

*. Mediciones realizadas a la salida de los separadores (ver Tabla 5.2). Valores normales de la conductividad dentro de los rangos habituales para los lavados y engrasados.

**.

Falta por confirmar este dato debido a que es el único donde se nota una concentración de DQO menor que la concentración de grasas y aceites.

De la Tabla 3.7 se puede establecer que:

1. Los datos generalmente son muy variables entre sí, debido a que el procedimiento de lavado de los vehículos es muy diferente para cada uno de ellos, ya que depende, entre otras cosas, de qué tan sucio se encuentra el chasis, el motor o la carrocería del auto o camioneta, del estilo de lavado del empleado, de las sustancias desengrasantes que se utilizan, del tipo y tamaño de vehículo, del tipo de tomas de agua con las cuales cuenta el taller, entre muchos otros factores.
2. La concentración promedio de grasas y aceites de las muestras de los talleres de lavado y engrasado es de 588 mg/L, con un máximo de 1063.1 mg/L y un mínimo de 185.8 mg/L. En el taller de reparación de autobuses se presenta una concentración ligeramente menor al promedio (414.1 mg/L).
3. De acuerdo con los resultados de las pruebas de susceptibilidad, las aguas de los talleres A630 y A626 pueden tratarse con un separador de grasas y aceites convencional, porque tienen una fracción emulsificada por debajo de los límites de la norma. El taller A630 tiene sólo 61.5 mg/L de aceites emulsificados y el taller A626 únicamente 69.5 mg/L. Por el contrario, las pruebas de susceptibilidad de los talleres A628, A629 y A606 muestran niveles de grasas y aceites emulsificados de 115 a 456 mg/L. Se puso de manifiesto, en el punto 5 de la sección 5.1.2, que los dos grupos de talleres (los que cumplen y los que no cumplen la norma) tienen un comportamiento diferente atribuible al desengrasante que utilizan. Siempre se había puesto como hipótesis que, en general, el uso de jabones podría impedir el correcto funcionamiento de los separadores; sin embargo, los resultados muestran que, los separadores de grasas y aceites convencionales de los talleres de lavado y engrasado, podrían no necesitar un rompimiento de las emulsiones si se selecciona adecuadamente su desengrasante.
4. Las aguas residuales de los talleres de radiadores tienen menores concentraciones de grasas y aceites (166.3, 184.9 y 40.4 mg/L) que las aguas residuales de los centros de lavado y engrasado. Aún así, llegan a rebasar los límites máximos permisibles.
5. Las aguas residuales tienen valores de la DQO muy altos y variables, aún después de pasar a través de algún separador eficiente. En los talleres de lavado y engrasado se encuentran concentraciones de 147 a 7814 mg/L, en el taller de autobuses (A626) de 1826.2mg/L y en los talleres de radiadores de

957.8 a 1303.0mg/L. En los talleres de lavado y engrasado y en el taller de autobuses estos valores de la DQO pueden deberse, muy probablemente, a la presencia de detergentes. En los talleres de radiadores es muy factible atribuir el nivel de DQO a los residuos de anticongelantes. Estos valores tan altos de la DQO colaboran potencialmente en la generación de malos olores, principal obstáculo que encuentra la promoción de una cultura de reuso del agua en los talleres (Rosenblum, 2001). Lo anterior se corroboró en los talleres de Toluca. En todos los casos estos valores limitan las posibilidades de reusar el agua, ya que para reutilizarla es necesario eliminar, entre otros parámetros, la DQO, implementando sistemas de tratamiento adicionales al separador.

6. El pH de todas las muestras respeta los límites que marca la norma NOM-002-ECOL-1996, salvo una muestra del taller A964 que rebasa ligeramente el límite inferior de 5.5 que dicta la norma.
7. Las muestras de los talleres de radiadores tienen una conductividad muy alta (858 a 6980 $\mu\text{S}/\text{cm}$), debida probablemente a la presencia de ciertas sales y a fragmentos de metales arrastrados de los sistemas de enfriamiento. Las normas NOM-001-ECOL-1996 y NOM-002-ECOL-1996, las cuales se muestran parcialmente en el Anexo F, no establecen límite alguno para este parámetro; sin embargo, sus elevados niveles hacen pensar que la presencia de ciertos metales, no reportada aquí, pero señalada en la bibliografía (M.P.C.A., 1998; Fall *et al.*, 1999) podrían hacer de estas aguas un residuo peligroso. La conductividad registrada en los efluentes de los demás talleres está dentro de los límites habituales.
8. Las muestras de los talleres A628 y A629 tienen una concentración elevada de SST (de 612 a 728 mg/L). Éstos valores deben considerarse fuertemente para diseñar los separadores de grasas y aceites de los talleres, con la capacidad y eficiencia suficiente para disminuir los SST muy por debajo de los 200 mg/L que establece la norma NOM-001-ECOL-1996.

3.1.4.2. Características base de los aceites nuevos y usados

En el Anexo B se muestra la densidad de diversos aceites comerciales que se emplean diariamente para lubricar los motores de un sinnúmero de equipos, vehículos y maquinaria en general, y corresponden a los tipos de aceites más comunes (5W-30, 10W-30, 10W-40, 15W-40, grado 40, grado 50, grado 60). Además de ellos, el Anexo B contiene también la densidad relativa de distintos aceites usados que se recolectaron directamente de los tambos de acopio que se encontraron en los talleres visitados.

Para completar el análisis, se incluye la densidad relativa de algunos combustibles.

Las características de las sustancias analizadas se determinaron a 10 y 15 °C.

Los valores que corresponden a las temperaturas de 10 y 15 °C, en su mayoría se determinaron en el Laboratorio de Calidad del Agua del C.I.R.A., salvo algunas excepciones.

La mayor parte de las densidades de los aceites nuevos se obtuvieron directamente del análisis bibliográfico y en internet (dirección <http://siri.uvm.edu/msds/h/>), por ello presentan su densidad a una temperatura de 40 °C, la cual es una temperatura estándar de interés que manejan los fabricantes, pero que no es relevante para el presente estudio.

En la Tabla 3.8 se muestra un resumen de las densidades relativas de los diversos aceites que se estudiaron, definiendo de acuerdo con la temperatura y con el tipo de aceite (nuevo o usado), la densidad relativa mínima, máxima y promedio.

Tabla 3.8. Resumen de las densidades relativas de distintos tipos de aceites nuevos y usados a 10, 15 y 40°C.

Temperatura °C	Valores	Densidad Relativa S	
		Tipo de aceite	
		Nuevos	Usados
10°C	Máximo	0.901	0.911
	Promedio	0.899	0.880
	Mínimo	0.897	0.835
15°C	Máximo	0.897	0.900
	Promedio	0.884	0.875
	Mínimo	0.893	0.835
40°C	Máximo	0.891	-
	Promedio	0.870	-
	Mínimo	0.850	-

Observando la Tabla 3.8 se puede determinar que, la máxima densidad relativa la obtuvo un aceite usado a la temperatura de 10°C, alcanzando un valor de 0.911, seguido por la densidad relativa de 0.901 que registró un aceite nuevo a la misma temperatura.

De igual manera, se puede mencionar que la densidad relativa mínima fue de 0.835 a 10°C, y corresponde a diesel usado.

De tal manera que, con base en la ecuación 1.1, se podría establecer que el aceite que obtuvo la densidad relativa de 0.911 es el fluido que opondrá mayor resistencia a la remoción. Esta sustancia es un aceite usado que se recolectó directamente, durante un cambio de aceite, de la salida del cárter de una camioneta pick up.

El aceite nuevo Quaker State HD SAE 60 fue la sustancia oleosa que presentó la densidad relativa de 0.901 a 10°C, muy cerca del máximo registrado para los aceites usados. Lo que justifica su selección como aceite modelo en los estudios posteriores del separador piloto.

3.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEPARADOR PILOTO

En este apartado se presentan los resultados del diseño, construcción y configuración del separador piloto de grasas y aceites y de los diversos accesorios que lo integran.

El separador piloto se diseñó con un caudal medio de operación de 10 L/min (0.17 L/s) y máximo de 15 L/min (0.25 L/s), temperatura de 10 °C, densidad del agua de 999.7 kg/m³, densidad del aceite de 920 kg/m³, diámetro medio de las partículas de aceite de 0.15 mm (150 µm) y viscosidad dinámica del agua de 1.3x10⁻⁶ m²/s.

Las dimensiones teóricas se ajustaron ligeramente para tomar en cuenta las limitaciones prácticas que involucró la construcción del modelo.

Al final se construyó un separador piloto con un ancho de 0.30 m, longitud máxima de 1.90 m y altura máxima de 0.70 m, con una cámara receptora y una cámara final de captación, cada una con una longitud de 0.189 m. La cámara receptora juega también el papel de trampa de sólidos.

La Figura 3.2a muestra una fotografía completa del separador durante su construcción y la Figura 3.2b una imagen del separador terminado.

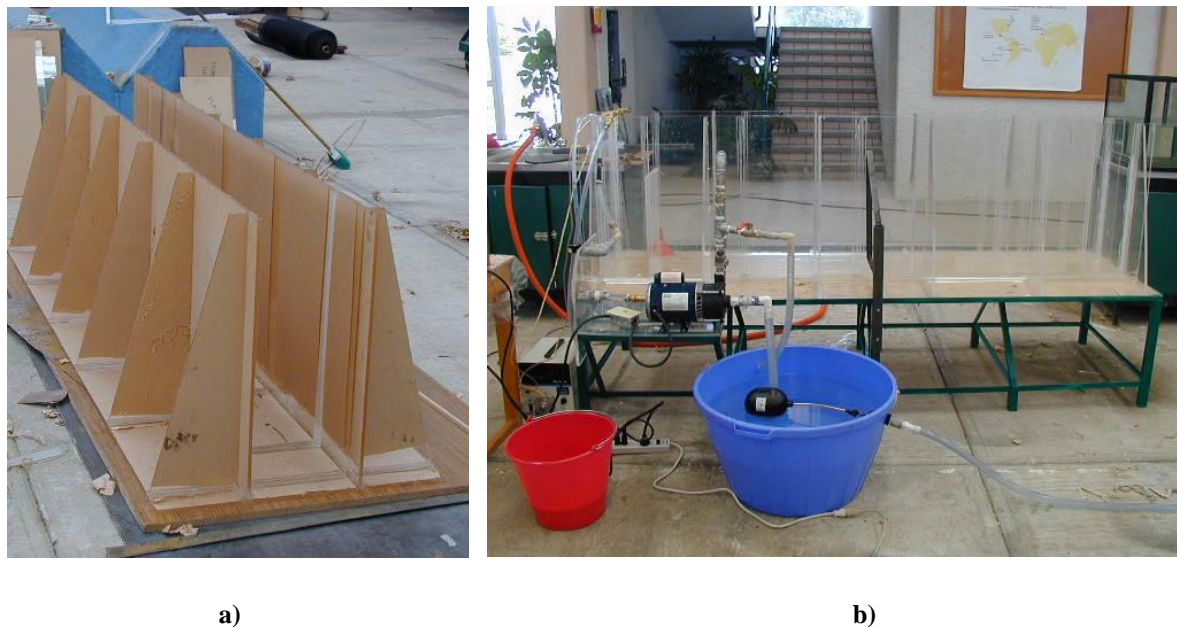


Fig. 3.2. El separador piloto de grasas y aceites: **a)** durante su construcción; **b)** terminado.

Las paredes y el fondo del separador se construyeron con placas de acrílico de 12 mm de espesor, así como también los 12 atiesadores laterales (6 de cada lado) que proveen de estabilidad y resistencia al canal, mientras que los vertedores se elaboraron con placas de 6 mm y la mampara de retención con una placa de 10 mm.

Para que el separador tuviera la capacidad de operar con distintos vertedores y alturas, se consideró en su diseño, la presencia de diversas guías, elaboradas con el mismo material que el separador, que favorecerían el intercambio de las placas que conformarían los vertedores. Esta opción también se adoptó para el caso de la mampara de separación.

Las guías que alojan a los vertedores de entrada y de salida, se colocaron de tal manera que el separador puede trabajar con tres diferentes longitudes (1.00, 1.50 y 1.90 m), con lo cual el sistema funciona con relaciones largo/ancho de aproximadamente 3.3, 5.0 y 6.3.

Por otra parte, para la mampara de retención se colocaron dos guías que permiten que esta placa pueda ubicarse a 0.20 y 0.40 m de distancia del vertedor de salida. Dicha mampara cuenta con la capacidad suficiente para operar a cualquier profundidad.

El separador puede operar con dos diferentes alturas o profundidades (0.40 y 0.55 m), niveles que se controlan mediante la altura del vertedor de salida, ya que éste regula la altura del agua dentro del canal al determinar el nivel de vertido del efluente. Por lo anterior, se construyeron dos juegos de vertedores de salida a 0.40 y 0.55 m de altura, con dos tipos de vertedores, uno rectangular y otro con orificios a los cuales se les conectó un tubo de P.V.C. de $\frac{3}{4}$ pulg (1.90 m) que permite descargar el agua del efluente ubicada cerca del fondo del separador (Figura 3.3).

Los vertedores de entrada se construyeron considerando los vertedores que más se emplean en este tipo de sistemas. Así, se construyeron dos juegos de placas (un juego con una altura de 0.45 m y otro de 0.55 m) con 4 tipos diferentes de vertedores (rectangular, triangular múltiple, rectangular múltiple y una placa con tres orificios).

En la Figura 3.3 se muestra un dibujo de los diferentes vertedores de entrada y salida con los que puede operar el separador piloto.

La diferencia de 5 cm que existe entre la altura de los vertedores de entrada más altos y los vertedores de salida más elevados, se concibió para solventar las pérdidas hidráulicas que pudieran presentarse debido a la fricción de las paredes del canal, a la posición de la mampara de retención y a la posible colocación posterior de diversos elementos dentro del separador. Entre los vertedores de entrada más bajos y los

vertedores de salida más pequeños existe la misma diferencia de nivel para contrarrestar las pérdidas hidráulicas.

Fue necesario construir una base metálica para el separador para mantenerlo a una altura razonable sobre el nivel del suelo (40 cm), con el objetivo de que cualquier punto del sistema fuera completamente visible.

El sistema hidráulico, como pudiera resultar obvio, se concibió con la idea de contar con una bomba hidráulica de ½ H.P. para suministrar el gasto necesario al separador.

Adicionalmente, se anexó al diseño un tanque de almacenamiento conectado directamente a una toma de agua potable para asegurar que en todo momento el separador pudiera contar con la cantidad de agua suficiente para operar. Al tanque de almacenamiento se le instaló un control de volumen (flotador convencional) para regular el nivel del agua dentro de ciertos límites de seguridad, evitando tanto los posibles derrames como la carencia del líquido.

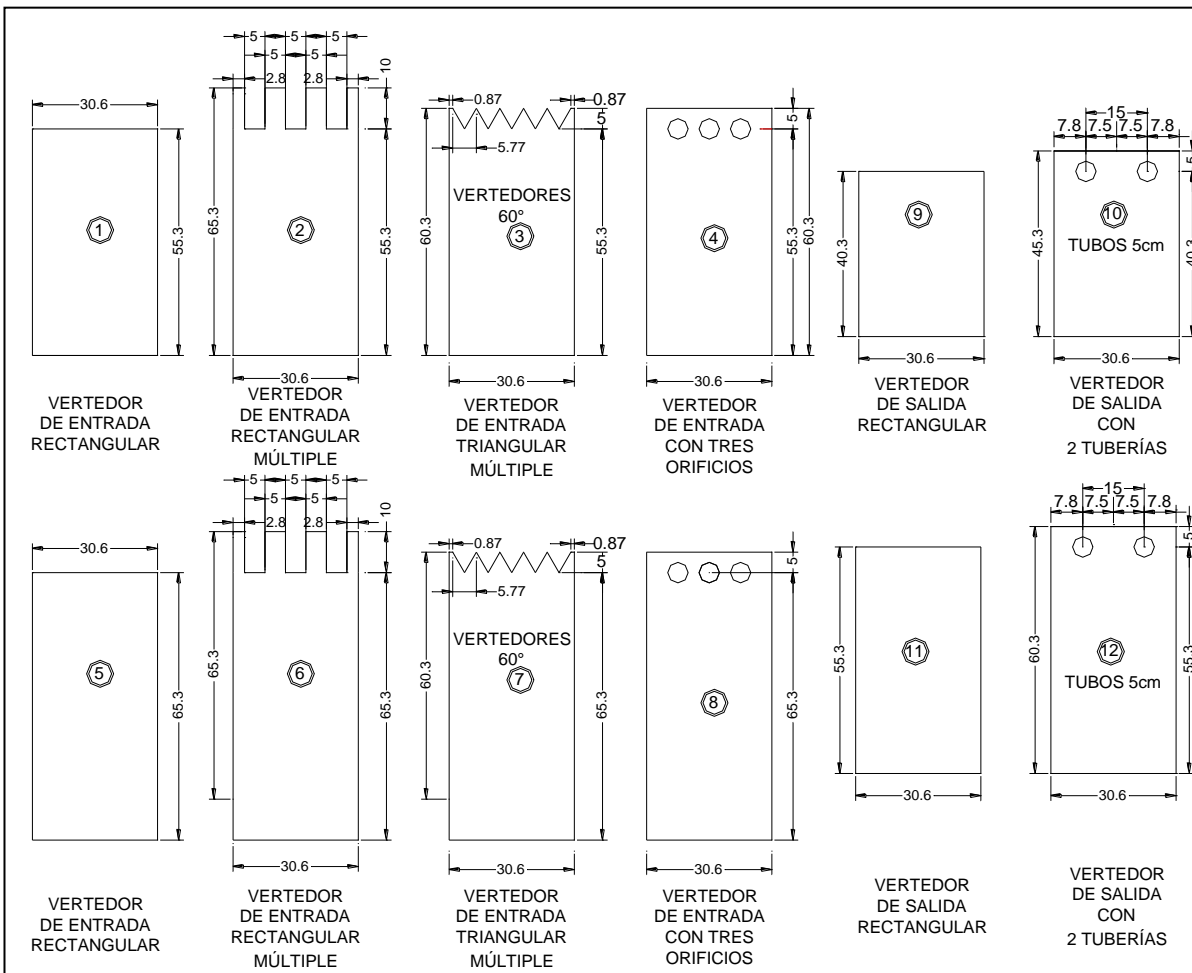


Fig. 3.3. Vertedores de entrada y salida del separador piloto.

Inmediatamente después de la bomba hidráulica, se instaló un par de llaves de compuerta para regular el caudal de funcionamiento del sistema y para derivar parte del caudal cuando esto pudiera requerirse.

Además, se colocó un totalizador volumétrico (medidor para agua) para verificar los volúmenes tratados, y un medidor de caudal para determinar y ajustar el gasto de operación del separador.

Después de los sistemas antes mencionados se instaló, sobre la misma línea de conducción principal constituida por una tubería de manguera flexible de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro (1.27 cm), una “T” de cobre para adicionar perpendicularmente al flujo el trazador o el aceite necesario para el tipo de pruebas que se realizarían.

Es importante mencionar que en la sección posterior a la “T” de cobre que se instaló para facilitar la dosificación del trazador o del aceite, se colocó el sistema de mezclado que generaría el influente modelo, sistema que será presentado en los capítulos siguientes.

Posteriormente, se colocó un sistema de inyección constituido simplemente por una tubería de P.V.C. de $\frac{3}{4}$ pulgada de diámetro (1.90 cm), con un codo del mismo material, para asegurar que la manguera que conduce el influente se encontrara dentro de la cámara receptora, vertiendo el agua del influente a una altura media, con lo cual se favorece la disipación de la energía que pudiera traer consigo el flujo.

En la Figura 3.4 se presenta una fotografía del sistema hidráulico del separador.

En la parte final del separador, en la zona inferior de la cámara recolectora del efluente, se localiza la tubería que desaloja el flujo, la cual está elaborada con P.V.C. de $\frac{3}{4}$ pulgada (1.90 cm) conectada mediante un codo y una “T” del mismo diámetro a los orificios ubicados en el fondo de la cámara final. En un punto de la tubería ubicado por debajo del extremo lateral de la base metálica del separador, se encuentra otra “T” de P.V.C., esta “T” permite instalar un sensor para monitorear el efluente del sistema. La tubería de desalojo cuenta con un arreglo en forma de “U” invertida, que permite que la sección previa a este arreglo, justo en donde se instala el sistema de monitoreo, funcione a tubo lleno, facilitando la operación del sensor. Todo lo anterior se ilustra con la fotografía de la Figura 3.5.



Fig. 3.4. Sistema hidráulico del separador piloto.

La tubería de desalajo descarga el efluente del separador directamente a un tanque de almacenamiento final, al cual se le ha instalado una bomba hidráulica de 1/8 H.P. que desalja las aguas analizadas hacia el sistema de alcantarillado.



Fig. 3.5. Sistema de muestreo y de desalajo del separador.

3.3. EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DEL SEPARADOR PILOTO

La evaluación hidrodinámica del separador piloto se realizó analizando los datos que arrojaron las 16 corridas o pruebas que estableció el plan estadístico de Plackett y Burman.

El tipo de datos originales que se obtuvieron y los resultados de su análisis se ilustran con la Figura 3.6, en la cual se muestran, a manera de ejemplo, las gráficas de las curvas $C(t)$ y $E(t)$ de la corrida No. 1. En el Anexo D se presentan los datos y cálculos de la corrida No.1. El mismo anexo contiene las curvas $E(t)$ del resto de las pruebas.

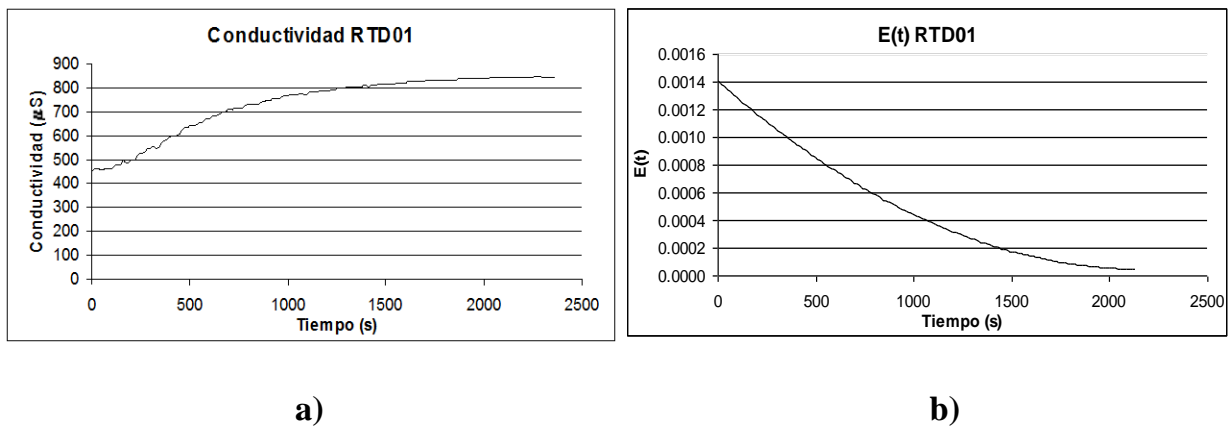


Fig. 3.6. Gráficas de la corrida No.1: **a)** Gráfica Conductividad vs Tiempo registrada con el software Adquidata-UAEM; **b)** Gráfica de la función de distribución de los tiempos de residencia $E(t)$.

Para la prueba No. 1 el análisis de la función de los tiempos de residencia determinó que el tiempo medio de residencia para esta configuración fue de 649.39 s, es decir, 10.82 min.

Todos los cálculos matemáticos necesarios para ajustar los datos de las curvas a una función polinomial y calcular las integrales que definen el tiempo medio de residencia, se realizaron con el software MatLab edición estudiantil (Matlab, 1996).

En la Tabla 3.9 se presentan los resultados obtenidos de las 16 pruebas. En ella se puede observar el tiempo medio de residencia (t_m), el tiempo de residencia nominal (θ) y la relación ε de cada una de ellas.

Es necesario recordar que ε es la relación t_m/θ . Esta relación se puede utilizar para evaluar la desviación que tiene el escurrimiento de cada configuración, con respecto, en cuanto a tendencia, al comportamiento que presentaría un flujo pistón ideal. ε sirve para determinar la posible presencia de zonas muertas y cortocircuitos, pero no proporciona los elementos necesarios para evaluar la dispersión de los flujos ni sus sesgos.

Tabla 3.9. Descripción de las corridas de la evaluación hidrodinámica y de sus valores de respuesta respectivos.

Corrida	Valor del factor						Análisis de los Tiempos de residencia		
	A	B	D	G	H	N	t_m min	θ min	$\varepsilon=t_m/\theta$
1	-	-	-	-	-	-	10.82	12.63	0.86
2	-	-	-	-	+	+	12.34	12.63	0.98
3	-	-	+	+	+	-	12.96	17.07	0.76
4	-	-	+	+	-	+	13.88	17.07	0.81
5	-	+	+	-	-	-	16.13	21.95	0.73
6	-	+	+	-	+	+	16.28	21.95	0.74
7	-	+	-	+	+	-	14.55	18.18	0.80
8	-	+	-	+	-	+	19.71	18.18	1.08
9	+	+	-	-	-	+	13.75	17.33	0.79
10	+	+	-	-	+	-	14.11	17.33	0.81
11	+	+	+	+	+	+	16.60	23.02	0.72
12	+	+	+	+	-	-	16.74	23.02	0.73
13	+	-	+	-	-	+	14.21	16.00	0.89
14	+	-	+	-	+	-	11.95	16.00	0.75
15	+	-	-	+	+	+	9.70	13.47	0.72
16	+	-	-	+	-	-	10.17	13.47	0.75

Los valores de ε varían desde un mínimo de 0.72 (corridas 11 y 15), hasta un máximo de 1.08 (corrida 8), demostrando que algunos de los flujos de las 16 pruebas se acercaron bastante a la tendencia que tiene un flujo pistón ideal; sin embargo, hubo algunos otros que evidenciaron distintos problemas hidrodinámicos (como cortos circuitos y volúmenes muertos), estos problemas se reflejaron directamente en la diferencia que presentó ε con respecto a la unidad.

Los flujos de las configuraciones o corridas que más se acercaron al comportamiento de un flujo pistón fueron la 2 y la 8, mientras que los que más se alejaron fueron los de las corridas 5, 11, 12 y 15.

Para determinar los factores que más influyen en la generación de un flujo pistón ideal, se realizó un análisis de varianza de la variable de respuesta ε , considerando las variables operativas A, B, D, G, H, y N. El análisis de varianza se muestra en el Anexo E.

Dicho análisis consiste en determinar la suma de cuadrados (SC) asociada a cada uno de los 15 contrastes que tiene el plan (A hasta O), los cuales evalúan los efectos de los factores y de cada una de las interacciones dobles o múltiples entre ellas.

Los contrastes del mismo nombre que los factores (A, B, D, G, H, y N) corresponden al efecto directo que tienen estos factores, mientras que los demás contrastes (C, E, F, I, J, K, L, M y O) se refieren al efecto que producen las interacciones de los factores principales.

Para identificar exactamente de cuáles interacciones se trata, hay que referirse a la información tabulada que acompaña a cada plan de Plackett y Burman (Wheeler, 1990), dependiendo de la resolución deseada.

Los resultados del análisis de varianza se muestran en la Figura 3.7, en ella aparecen, con un mayor porcentaje, los factores más importantes o que más influyen en la obtención de un flujo pistón.

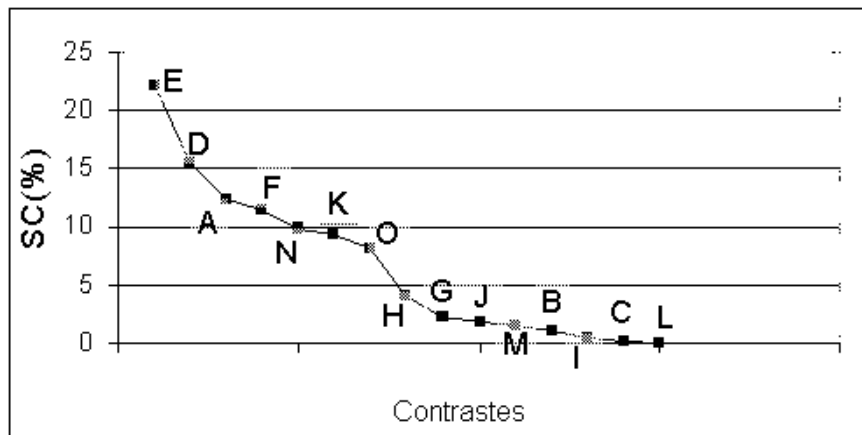


Fig. 3.7. Resultados del análisis de varianza del plan estadístico para la evaluación hidrodinámica.

En la Figura 3.7 se observa que los factores más significativos, en orden de importancia, son los contrastes E, D, A, F, N, K y O; donde E, F y K son contrastes de interacciones, estas interacciones involucran a los factores A y D; mientras que, el contraste O es una interacción de A y N.

Así, se puede establecer que los factores A, D y N, junto con sus interacciones, contribuyen hasta en un 90% a la suma total de cuadrados.

Lo anterior significa que estos tres factores operativos determinan hasta en un 90% el tipo de flujo que se genera en el separador.

De esta manera, el vertedor de entrada (factor A), la longitud del separador (D) y el porcentaje de penetración de la mampara de separación (N) son los parámetros operativos que mayor influencia tienen en el comportamiento hidráulico del separador piloto.

Los demás parámetros no tienen una influencia significativa.

Después del análisis estadístico, los resultados se presentaron en un diagrama de respuesta en función de los factores significativos A, D y N. Éste tiene como propósito identificar las combinaciones que tienen un mejor desempeño, así como las combinaciones que se deben evitar.

Este análisis se basa en el dibujo de un cubo, al cual se le anotan en las aristas, todos los valores de la variable de respuesta que corresponden a todas las posibles combinaciones de las tres variables más importantes (Wheeler, 1990).

En la Figura 3.8 se muestran en las aristas del cubo los 16 valores de la variable de respuesta de las 8 combinaciones que existen entre las variables A, D y N.

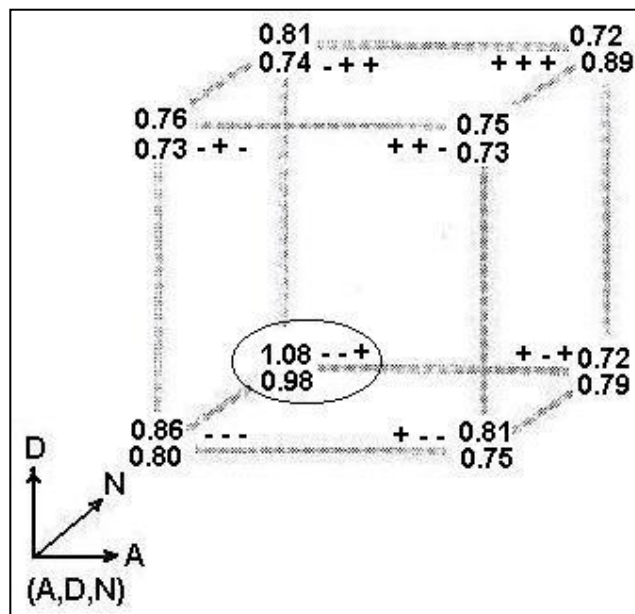


Fig. 3.8. Diagrama de respuesta de la evaluación hidrodinámica.

Con base en la Figura 3.8 se puede observar que, la mejor combinación es la que se encuentra en la arista $(A, D, N) = (-, -, +)$, es decir, la configuración que contiene los valores operativos A-, D- y N+.

Se observa que las configuraciones que operaron con el valor D- (longitud del separador de 1.50 m) tuvieron un mejor desempeño que las que funcionaron con D+ (1.90 m), mostrando que el flujo pistón se deteriora cuando se prolonga más el separador.

Cuando el separador operó con el valor de D-, el mejor desempeño hidrodinámico se obtuvo con el valor de A- (vertedor de entrada rectangular), pero este decreció cuando el parámetro A alcanzó a su valor superior (vertedor triangular múltiple).

Para el parámetro N (penetración de la mampara de separación) no se encuentra alguna tendencia significativa, salvo la participación de su valor superior en la configuración (A-, D-, N+).

Por lo que se puede mencionar que, de acuerdo con el diagrama de respuesta, las configuraciones más favorables son las que operaron con la combinación (A-, D-, N+), es decir, con el vertedor rectangular en la entrada (A-), la longitud del separador de 1.50 m (D-) y con una penetración de la mampara de separación de 50 % (N+).

Para determinar la influencia que podrían tener los dos vertedores de entrada que no fueron contemplados dentro del plan estadístico (vertedor rectangular múltiple y vertedor con tres orificios), se realizaron dos corridas adicionales con estos dos elementos, considerando la configuración de la corrida 14 y alternando los dos vertedores que no se habían analizado.

De esta manera, el valor de ε para la corrida adicional con el vertedor rectangular múltiple alcanzó un valor de 1.04; mientras que, la corrida adicional que se llevó a cabo con el vertedor con tres orificios registró una ε de 0.80.

El valor de 1.04 contrasta enormemente con la ε que registró la corrida 14 (0.75) y es muy similar a los dos valores de ε que se obtuvieron con las dos corridas más favorables del plan (corridas 2 y 8 con una ε de 0.98 y 1.08, respectivamente).

Se debe recordar que la única variable operativa que cambió entre la corrida 14 y las dos pruebas adicionales fue el vertedor de entrada, y al variar este único parámetro se pasó de un valor de ε de 0.75 a un valor casi ideal, lo cual refuerza los resultados que

arrojó el análisis estadístico, en el sentido de la importancia que tiene el vertedor de entrada en el flujo del separador piloto.

Por lo tanto, cualquiera de los dos vertedores rectangulares de entrada (el simple o el rectangular múltiple), la longitud del separador de 1.50 m y una penetración de la mampara de separación de 50 %, favorecen la generación de un flujo pistón dentro del separador piloto de grasas y aceites.

En comparación con los vertedores menos favorecedores (triangular múltiple y el de orificios) los dos vertedores rectangulares distribuyen mejor el flujo, ya que los otros dos concentran el flujo en ciertos puntos.

3.4. PRUEBAS PRELIMINARES A LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SEPARADOR PILOTO

3.4.1. Selección del aceite modelo

Con base en el análisis de las características base de los aceites nuevos y usados, se definió que el aceite que presentó la mayor densidad relativa, fue un aceite usado que tuvo una densidad de 0.911 a una temperatura de 10°C, seguido por un aceite nuevo común, que a la misma temperatura, alcanzó una densidad relativa de 0.901.

Como se recuerda, la remoción de un aceite o grasa se dificulta a medida que su densidad se aproxima a la del agua, por lo que el aceite usado con densidad relativa de 0.911 es el aceite que más difícilmente podrá removerse, seguido por el aceite nuevo que registró una densidad de 0.901. Estos dos fluidos representan muy bien el rango de alta densidad de los aceites, quienes por lo regular están entre 0.860 (diesel) y 0.920.

Por lo tanto, se eligió al aceite nuevo como el aceite modelo para operar el separador. Este último porque es más fácil de conseguir y de usar que el aceite usado. Al ser un aceite comercial con características constantes (Quaker State HD SAE 60 para motores a gasolina), se puede adquirir, en ciertos establecimientos de la Ciudad de Toluca.

El aceite usado se descartó porque es muy difícil asegurarse de que siempre se obtengan muestras que presenten las características deseadas de densidad. Las características de los aceites usados son muy particulares y dependen del tipo de aceite nuevo, de las condiciones operativas del vehículo y de los periodos de cambio de aceite, entre otros factores.

3.4.2. Selección del sistema de mezcla aceite/agua

Se evaluaron distintos sistemas de mezcla del aceite con el agua, determinando sus respectivos patrones de distribución de tamaño de partículas.

Todas las pruebas que se analizaron se realizaron generando la mezcla aceite/agua con el aceite modelo seleccionado (Quaker State HD SAE 60), excepto las primeras evaluaciones que se hicieron con un aceite multigrado (Quaker State 15W-40). Este último no se tomó en cuenta porque generó una emulsión muy estable.

En la Tabla 3.10 se muestra un resumen de los datos promedio de las distribuciones de tamaño de las gotas de aceite de todas las pruebas que se realizaron con los sistemas de mezcla estudiados.

El agua presentó una temperatura media entre 10 y 12°C y el aceite se bombeó a una temperatura de 39 a 44°C.

Tabla 3.10. Distribución de tamaño de las gotas de aceite con respecto a los sistemas de mezcla aceite/agua.

Parámetros Operativos				Características de la distribución de tamaño de partículas				
Caudal de Agua		Sistema de mezcla	Dosificadora de aceite		Media	Mediana	Desviación Estándar	% partículas <150µm
			No.	Aceite				
L/min	L/s			No.	mL/min	µm	µm	
13.8	0.23	Medio mezclador helicoidal*	1	4.50	15	15	4.7	92
11.0	0.18	Un mezclador helicoidal*	1	4.50	28	33	4.4	89
7.5	0.13	Dos mezcladores helicoidales*	1	4.50	47	59	4.0	82
10.0	0.17	Reducción de diámetro	1	4.40	78	107	4.2	63
10.0	0.17	Reducción de diámetro	1	7.40	81	112	4.6	61
14.6	0.24	Reducción de diámetro	1	4.40	37	48	5.1	82
14.6	0.24	Reducción de diámetro	1	4.80	23	27	4.8	90
14.6	0.24	Reducción de diámetro	1	7.40	30	35	5.4	80
10.0	0.17	Reducción de diámetro	2	4.50	73	98	3.9	69
10.0	0.17	Reducción de diámetro	2	4.80	64	86	3.6	77

*. Mezclador en línea helicoidal alternado con 12 elementos (12 cambios de dirección internos) de 5/8 pulg de diámetro (1.59 cm) y longitud de 8 ½ pulg (21.6 cm).

En general, todas las pruebas produjeron diferentes mezclas aceite/agua que tuvieron un diámetro medio de partículas por debajo de las 90 µm, con un alto porcentaje de ellas inferior a las 150 µm.

La desviación estándar que se muestra en la Tabla 3.10 se calculó tomando como referencia a la media. El volumen de partículas inferiores de 150 μm se calculó considerando el volumen total de gotas que ingresaron a la celda de análisis del medidor de tamaño de partículas.

En las tres primeras pruebas se utilizaron mezcladores en línea de tipo helicoidal alternado con 12 elementos (la mitad de un mezclador, un mezclador completo y dos mezcladores), con el mismo caudal de aceite pero con diferentes niveles de agua.

En la tabla anterior se observa que los sistemas que utilizaron este tipo de mezclador en línea generaron una mezcla con un diámetro medio de gotas de aceite de 15 a 47 μm , con un porcentaje de partículas menores de 150 μm de 82 a 92 %.

Los caudales de operación en estas primeras pruebas dependieron directamente del nivel de pérdidas de carga que se presentó en el sistema y, en ninguno de los casos, fue posible controlar de manera independiente el caudal de la bomba de agua, lo que se corrigió en las pruebas subsecuentes que involucran la reducción de diámetro.

En las pruebas que involucran el uso del tubo delgado (tubo de 10 cm de longitud por 0.32 cm de diámetro interno), se evaluaron dos niveles de caudales controlados a 10 y 14.6 L/min de agua (0.17 y 0.24 L/s, respectivamente). En cada caso se varió el caudal de aceite entre varios niveles.

Las pruebas que se llevaron a cabo con el sistema de reducción de diámetro y el caudal de 10 L/min (0.17 L/s), fueron las que generaron distribuciones más equilibradas del tamaño de partículas, es decir, sin que se observara cualitativamente algún dominio de un tamaño de partículas. Se presentaron diversas distribuciones con un tamaño medio de partículas entre 64 y 78 μm , con un porcentaje de ellas inferior a 150 μm de 61 a 77%.

Los diferentes volúmenes de dosificación del aceite (4.5 a 4.8 mL/min) son las causas de las variaciones registradas con el caudal de 10 L/min (0.17 L/s). Estas variaciones son relativamente pequeñas comparadas con las variaciones que ocasionan el cambio del caudal de agua y el tipo de mezclador.

Las pruebas que se realizaron con el caudal de 14.6 L/min (0.24 L/s, caudal máximo de diseño del separador piloto) presentaron, de manera similar a las pruebas anteriores, una distribución del tamaño de gotas muy uniforme: diámetro medio de partículas entre 23 y 37 μm con un porcentaje de partículas inferior a las 150 μm de 80 a 90%, según el nivel de aceite dosificado.

Globalmente, los sistemas de mezcla evaluados permitieron producir tres diferentes rangos de perfiles de distribución con los diámetros medios respectivos de 15 a 47 μm , 23 a 37 μm y 64 a 78 μm . Y un porcentaje de gotas menores de 150 μm de 92 a 61 %.

Como se recuerda, los separadores de grasas y aceites convencionales se diseñan considerando que sólo pueden remover partículas oleosas que tengan un tamaño superior a 150 μm , por lo que, cualquiera de los sistemas de mezcla evaluados podrían exigir al máximo el desempeño del separador piloto.

Al considerar el tamaño de diseño de 150 μm (remoción de partículas mayores de 150 μm) la eficiencia correspondiente que se podría esperar del separador, desde un punto de vista teórico, debería encontrarse entre 8 y 39 %, según el efluente modelo utilizado.

Se optó por seleccionar el efluente modelo del tercer grupo de mezclas, donde el caudal de 10 L/min de agua (0.17 L/s), combinado con el mezclador de reducción de diámetro, produce un tamaño promedio comprendido entre 64 y 80 μm , con una proporción de entre 61 y 74 % de ellas menores a 150 μm . Este efluente modelo opera con la bomba dosificadora No. 2 activada al 40 % de su capacidad (4.6 mL/min de aceite).

El sistema de mezcla elegido se seleccionó porque opera con el caudal nominal de diseño del separador de 10 L/min (0.17 L/s) y produce un tamaño medio de partículas de 73 μm con un 69 % de ellas inferior a las 150 μm , sin que se observen emulsiones blanquecinas (Figura 3.9).

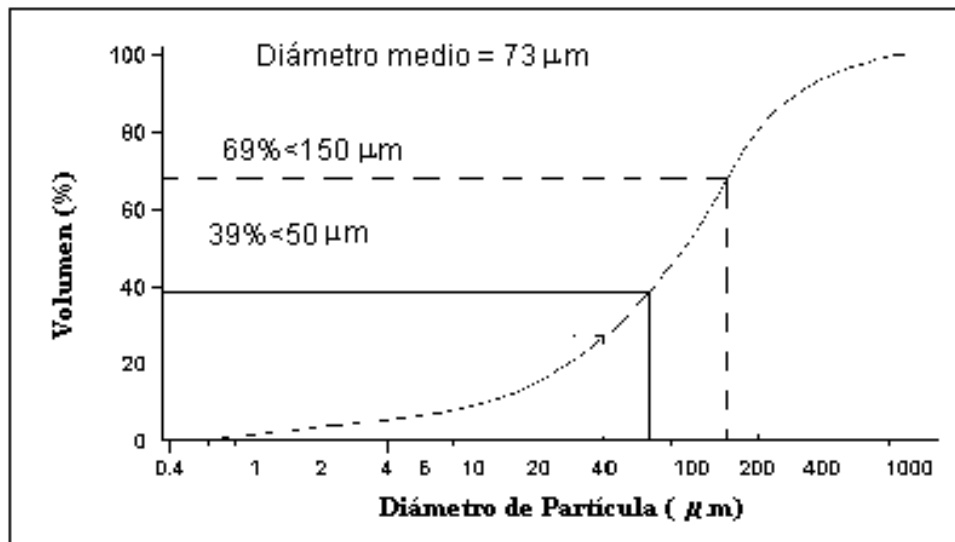


Fig. 3.9. Gráfica acumulada de la distribución del tamaño de partículas del sistema de mezcla seleccionado.

La Figura 3.9 es el resultado promedio de 10 mediciones repetitivas de la distribución de tamaño. La proporción de partículas menores a 50 μm en la mezcla modelo seleccionada es de 39 %, superior al 20 % sugerido en la norma ASTM D 6104. Esta norma considera un aceite tipo SAE 90 con una densidad de 930 kg/m^3 a una temperatura de 15.5 °C (ASTM, 1997). En las otras mezclas donde se pudo alcanzar la proporción de 20 % de partículas menores de 50 μm , se observó que con el aceite modelo utilizado (SAE 60), se desarrollaba una emulsión muy intensa (agua blanquecina) cuya tentativa de remoción, con un separador convencional de grasas y aceites, sería irreal.

Los sistemas que utilizaron mezcladores helicoidales en línea no se seleccionaron porque produjeron una mezcla muy estable (la emulsión duraba hasta 24 horas), con partículas de aceite muy pequeñas que iban a ser muy difíciles o casi imposibles de remover, además de que operan con un aceite diferente al aceite modelo seleccionado (Q.S. SAE 15W-40). Los sistemas de reducción de diámetro que operaron con un caudal de aproximadamente 15 L/min (0.24 L/s) se desecharon por la misma razón.

3.5. EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DEL ACEITE

3.5.1. Evaluación de la separación en columna batch

Se realizaron tres series de evaluación de columna batch (columna con llaves de muestreo). La primera prueba se realizó con el aceite Q. S. SAE 15W-40 y las dos posteriores con el aceite modelo (Q. S. HD SAE 60). Los efluentes modelos respectivos corresponden a las mezclas de las filas 3, 7 y 9 que se presentan en la Tabla 3.10 anterior.

La concentración inicial de la prueba número 3, fue seis veces superior a la concentración inicial de las pruebas de evaluación de la distribución de tamaño de partículas (fila 9, Tabla 3.10). Se consideró que esta situación no induce diferencias significativas en la distribución del tamaño de partículas, tal y como se mostró anteriormente con los datos de la Tabla 3.10.

En las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12 se muestran las curvas de remoción en función del tiempo de las tres pruebas batch para sus cuatro profundidades analizadas.

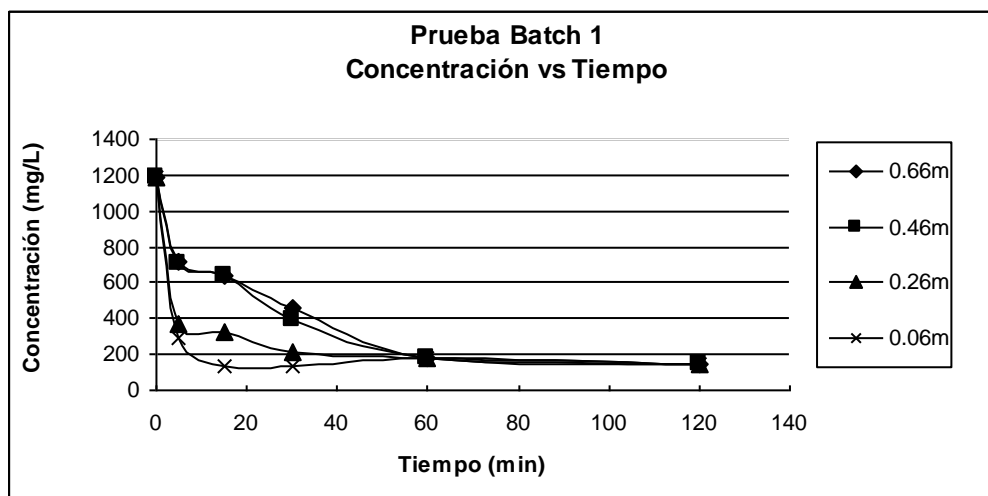


Fig. 3.10. Gráfica Concentración vs Tiempo para la prueba batch número 1. Efluente con aceite Q.S. SAE 15W-40 (82 % de las partículas menores de 150 μm).

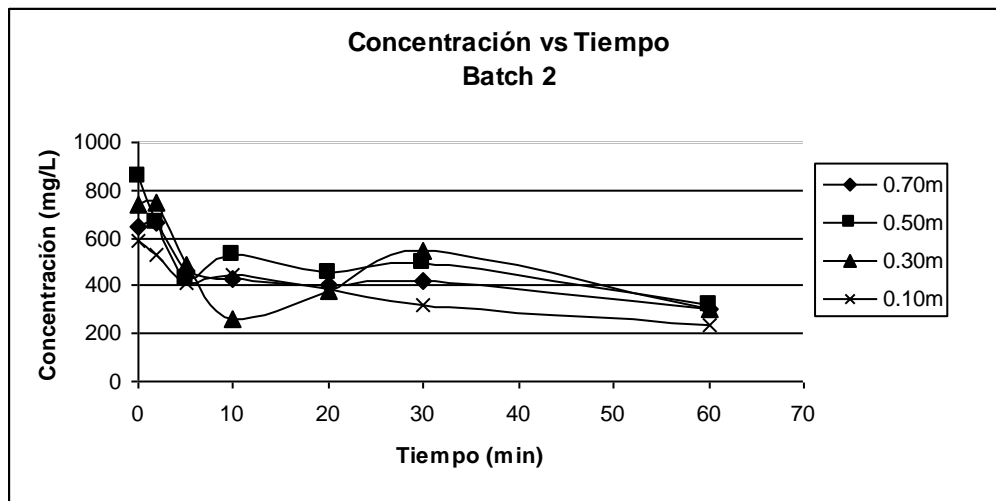


Fig. 3.11. Gráfica Concentración vs Tiempo para la prueba batch número 2. Efluente modelo con aceite Q.S. HD SAE 60 (90 % de las partículas menores de 150 μm).

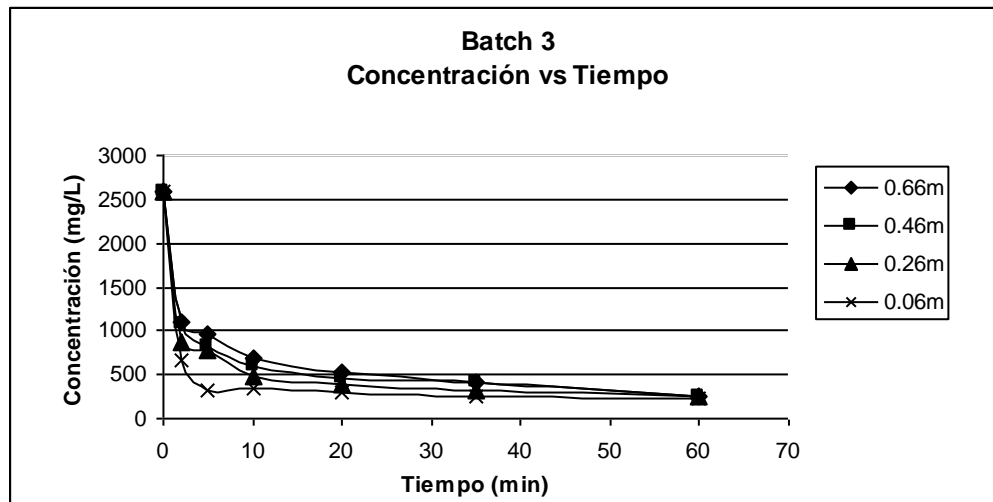


Fig. 3.12. Gráfica Concentración vs Tiempo para la prueba batch número 3. Efluente modelo con aceite Q.S. HD SAE 60 (69 % de las partículas menores de 150 μm).

Las alturas de las curvas de concentración que se muestran en las gráficas anteriores, se determinaron considerando los niveles de las llaves de muestreo con respecto al fondo del tanque batch y al nivel final del agua al término de las pruebas.

Desafortunadamente, los datos que registró la prueba batch número 2 no presentaron un comportamiento normal. Como se puede ver en la Figura 3.11, las cuatro curvas que conforman la gráfica se intersectan entre ellas en diversas ocasiones, cuando lo más natural debería ser que esto no sucediera.

Las anomalías que presenta la prueba batch número 2 pueden deberse probablemente, entre otras causas, a fallas o falta de limpieza de las llaves de muestreo de la columna de acrílico, a errores al purgar las llaves antes de recolectar las muestras, o a la acumulación excesiva de aceite en las tuberías que conectan las llaves con el interior de la columna.

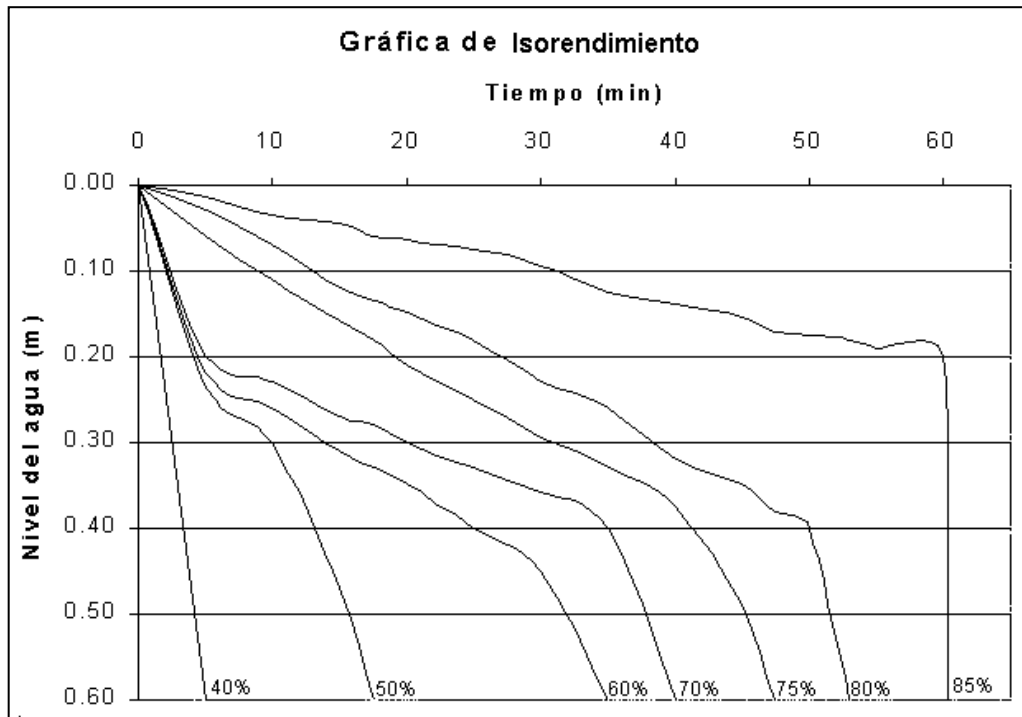
Es necesario mencionar que el análisis de la distribución del tamaño de partículas de las muestras de la prueba batch 2, no pudo realizarse por completo porque las muestras recolectadas no alcanzaron el nivel mínimo de obscurrescencia que requiere el equipo (Coulter LS 100Q) para poder hacer el análisis. Todas las muestras que se destinaron a este análisis, excepto la que se tomó al tiempo $t=0$, se recolectaron a través de la llave número 2 (segunda llave de arriba hacia abajo, altura aproximada de 0.26 m). La única muestra que pudo analizarse fue la que se recolectó directamente del sistema de mezcla aceite/agua antes de iniciar la prueba (tiempo 0) y registró datos muy similares a los que se obtuvieron durante la selección del sistema de mezcla para los mismos parámetros operativos.

Adicionalmente a las curvas de Concentración vs Tiempo de las pruebas batch 1 y 3, se obtuvieron sus respectivas gráficas de remoción en función del tiempo y de la profundidad, ambas se muestran en las Figuras 3.13 y 3.14.

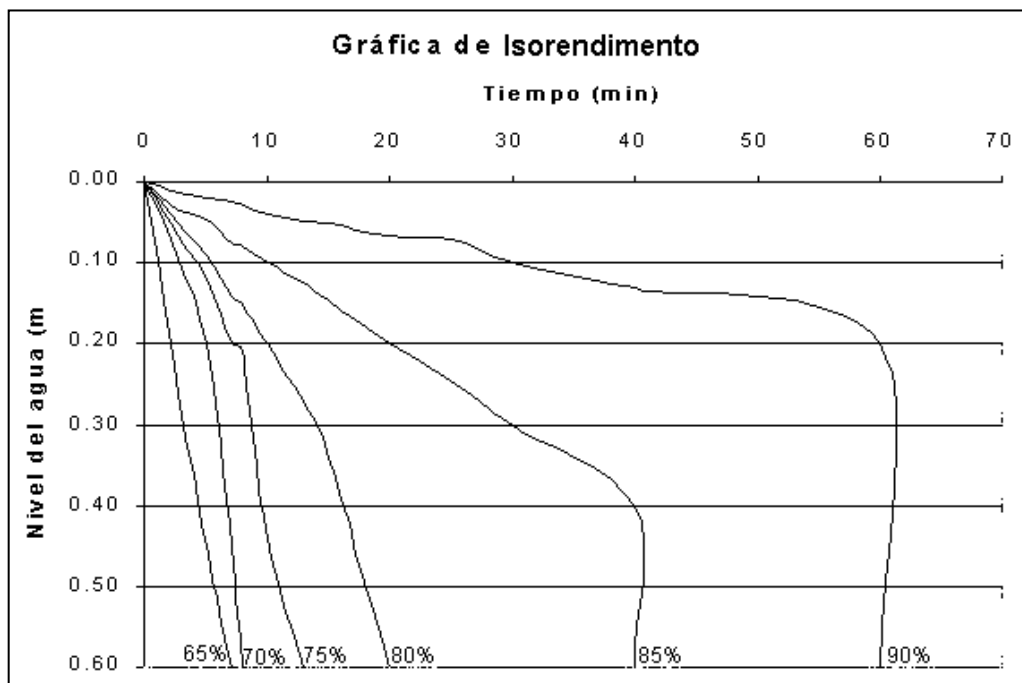
La concentración inicial de aceite en la primera prueba batch fue de 1189 mg/L, mientras que para la tercera prueba fue de 2577 mg/L (influyente modelo seleccionado).

Las curvas de isoremoción de las Figuras 3.13 y 3.14 no difieren considerablemente del comportamiento y forma que tienen las curvas clásicas de remoción por sedimentación. Además, su comportamiento entre ellas es muy similar, con la principal diferencia de que se obtuvieron ligeramente mejores eficiencias en la prueba batch 3 (de hasta 90 % contra 85 % de la curva de isorendimiento máxima de la prueba 1, ambas curvas se desarrollan a 60 min).

Con las curvas de isoremoción se calcularon las gráficas de Eficiencia vs Tiempo (Figuras 3.15 y 3.16) y de Eficiencia vs Carga hidráulica superficial (Fig. 3.17 y 3.18) para las dos pruebas batch analizadas. Ambas gráficas se calcularon considerando dos posibles profundidades de análisis, esas profundidades fueron 40 y 55 cm, las mismas con las que opera el separador piloto.



3.13. Grafica de Isorendimiento para la prueba batch 1.



3.14. Grafica de Isorendimiento para la prueba batch 3.

Las gráficas de las Figuras 3.15 y 3.16 revelan que la profundidad no fue un parámetro determinante, en las dos pruebas batch, para incrementar la eficiencia de remoción de las gotas de aceite de los influentes estudiados. Únicamente en la prueba batch 1 la profundidad de 40 cm es ligeramente mejor a la profundidad de 55 cm (con 5% en algunos intervalos de tiempo), pero en general su comportamiento es casi idéntico.

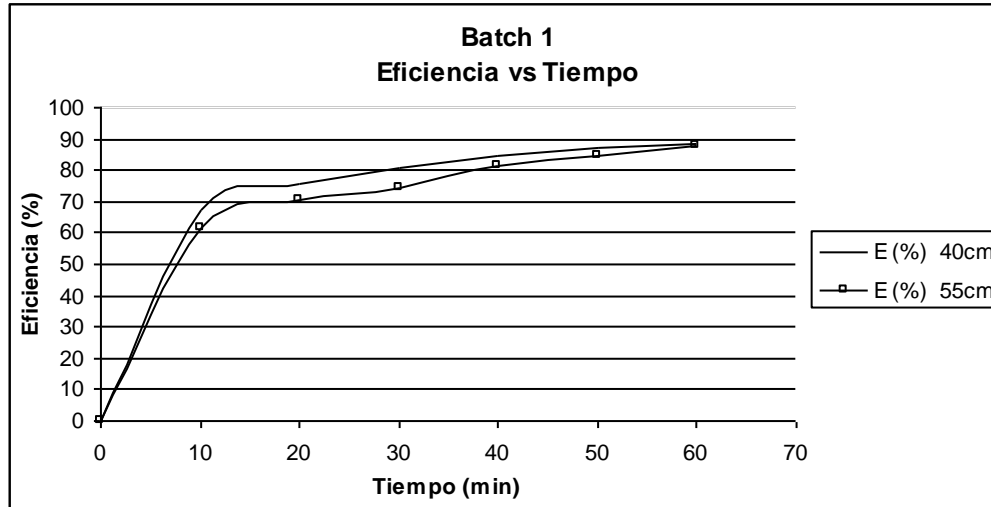


Fig. 3.15. Gráfica Eficiencia vs Tiempo para la prueba batch número 1.

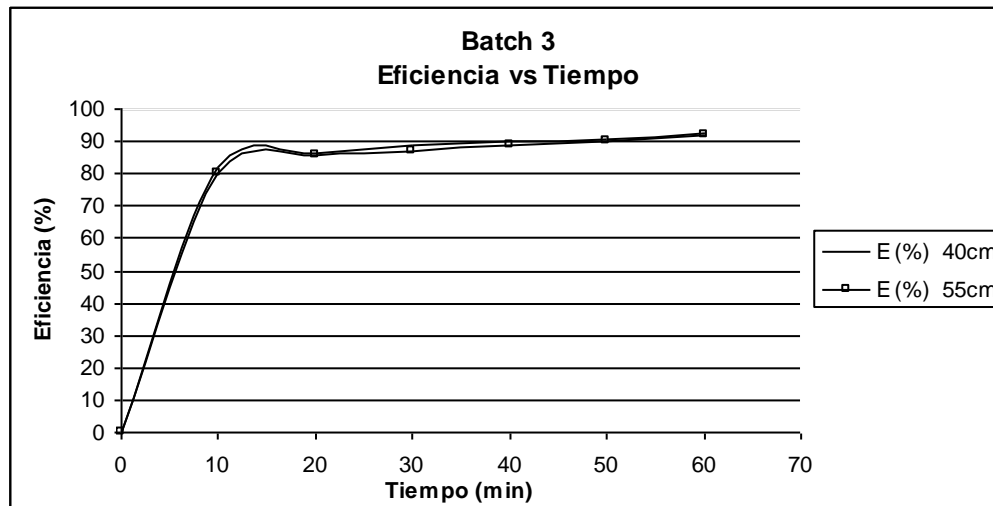


Fig. 3.16. Gráfica Eficiencia vs Tiempo para la prueba batch número 3.

En ambas figuras se nota que existe un incremento muy alto en la eficiencia en los primeros 20 minutos de duración de la prueba. La eficiencia en la prueba 1 alcanza casi el 75 % en ese intervalo (a 40 cm) y la prueba 3 poco más de 85 % (a 40 y 55 cm).

Debido al tamaño medio tan diferente de las gotas de aceite de los dos influentes, es posible visualizar que la prueba 1 requirió 30 minutos para alcanzar una remoción del 80 % y 60 minutos para llegar a 89 %, el cual es su valor máximo. La prueba 3 necesitó menos de 10 minutos para superar el 80 % y 40 minutos para 90 %, su eficiencia máxima es de 92 % a 60 minutos.

Ambas pruebas requieren 30 minutos adicionales para alcanzar su eficiencia máxima después de haber registrado la eficiencia de 80 % a 30min (prueba 1) y a 10 min (prueba 3).

La prueba 1 requiere una mayor cantidad de tiempo para remover las gotas de aceite porque éstas son menores que las partículas que se utilizaron para realizar la prueba 3.

Si fuese necesario construir un separador de grasas y aceites para eliminar las gotas del influente de la prueba 1, sería recomendable considerar como máximo un tiempo de retención hidráulico nominal de 30 min, para obtener una remoción aproximada de 80%. Si se consideran tiempos de retención mayores, únicamente se tendrán mayores costos de construcción y el beneficio será mínimo.

Por ejemplo, para construir un separador con un tiempo de retención de 40 min, en vez de uno que tenga un tiempo de 30 min, será necesario invertir, tentativamente, una tercera parte más del costo inicial y el beneficio en la eficiencia será de solamente 4 %.

La prueba batch número 3 representa e involucra el análisis del influente modelo que se seleccionó para operar el separador piloto.

Con base en la Figura 3.16 se puede mencionar que, un separador de grasas y aceites que posea un tiempo medio de residencia de 20 minutos, podrá asegurar una adecuada remoción de las partículas de aceite que contenga su influente, siempre y cuando el influente tenga una distribución del tamaño de partículas similar al de la prueba 3.

El periodo de 20 minutos es adecuado porque en este intervalo de tiempo alcanza la eficiencia de 86 %. Su máxima eficiencia es de 92 %, pero requiere casi 40 minutos extra después de que llegó a 86 % para poder alcanzarla, es decir, el doble de tiempo.

Por economía y eficiencia, para tratar un influente con las mismas características que el de la prueba batch número 3, es preferible adoptar como tiempo de retención hidráulico nominal al intervalo de 20 minutos.

Además de los estudios antes descritos, se obtuvieron las gráficas Eficiencia vs Carga hidráulica superficial (CHS) para cada una de las pruebas batch realizadas. Estas gráficas se ilustran en las Figuras 3.17 y 3.18.

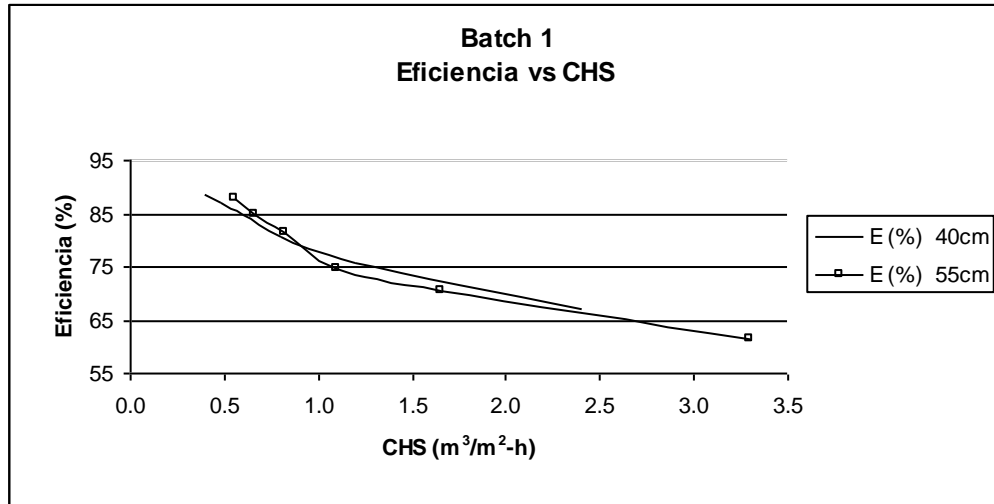


Fig. 3.17. Gráfica Eficiencia vs Carga hidráulica superficial de la prueba batch número 1.

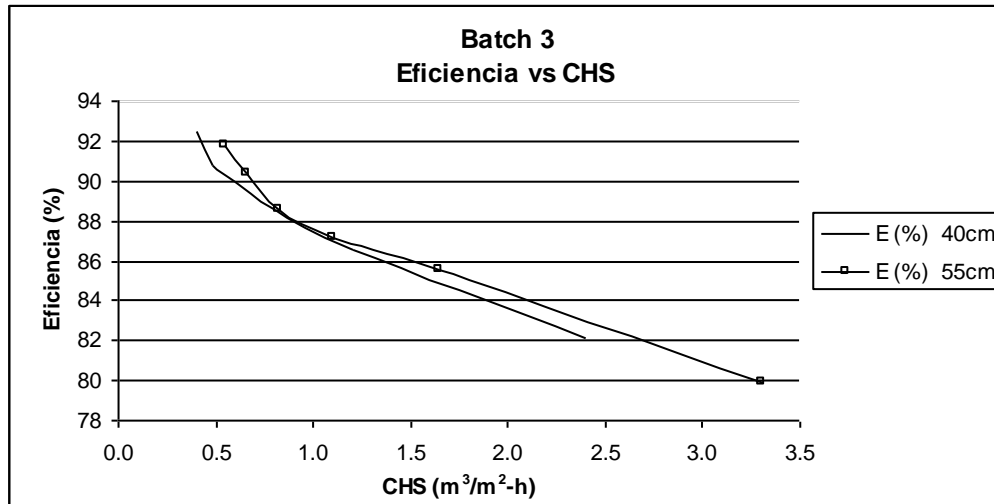


Fig. 3.18. Gráfica Eficiencia vs Carga hidráulica superficial de la prueba batch número 3.

Las curvas de las Figuras 3.17 y 3.18 manifiestan que la profundidad no es un factor determinante para la eficiencia de los separadores, ya que las curvas obtenidas a las dos profundidades analizadas se desarrollan casi de manera idéntica en ambas figuras.

Las curvas de la Figura 3.17 indican que para remover el influente de la prueba batch número 1 con una eficiencia de al menos 80 %, se requiere que el separador tenga una carga hidráulica superficial superior a $1.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($24 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$).

En la misma figura se puede ver que la eficiencia tiende a converger a un máximo de 90 % a medida que disminuye la CHS. Para fines de diseño puede ser recomendable elaborar el proyecto de un separador considerando una CHS de $1.20 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($28.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$) con el objetivo de obtener una eficiencia de alrededor de 75 %. Se adopta la CHS de 1.20 ($28.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$) porque CHS menores sólo pueden incrementar la eficiencia hasta un máximo de 90 %, pero se tendría que adoptar una CHS de $0.50 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($12.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$), el cual es un valor exageradamente pequeño.

La Figura 3.18 indica que, también para la prueba batch número 3, la eficiencia no depende radicalmente de la profundidad. Para obtener una eficiencia de alrededor del 84 %, se requiere una CHS de $2.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($48 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$). Para que el separador alcance la máxima eficiencia se necesita disminuir la CHS hasta $0.50 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$), pero únicamente se obtiene un aumento en la eficiencia de 8% con respecto a la CHS de $2.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($48 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$).

Desde el punto de vista costo-beneficio es mejor construir un separador de grasas y aceites con una CHS de $2.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($48 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$) que uno con una CHS de $0.50 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$), porque la diferencia en eficiencia que existe entre ambos es mínima, pero el costo de construir el separador con una CHS de $0.50 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$) será mucho mayor al del separador de $2.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($48 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$).

3.5.2. Evaluación de la eficiencia del separador piloto

La evaluación de la eficiencia del separador piloto para remover las partículas de aceite que contiene el influente reconstituido, se llevó a cabo siguiendo el mismo plan estadístico de la evaluación hidrodinámica del separador piloto (P.B. de 16 ensayos, con 6 factores de dos niveles), con las mismas variables y modalidades (Tablas 2.1 y 2.2).

De esta manera, el separador piloto se evaluó efluente modelo generado con el sistema de mezcla aceite/agua seleccionado previamente. Este sistema genera un influente que contiene una concentración media de 425 mg/L de aceite.

Los resultados de las 16 corridas de la evaluación de la eficiencia del separador se presentan en la Tabla 3.11. En dicha tabla el término [GyA] representa la concentración de grasas y aceites en la salida del separador (efluente tratado) y E (%)

denota la eficiencia que tuvo la configuración respectiva para remover el aceite ($E(\%) = \frac{C_{\text{inf luyente}} - C_{\text{efluente}}}{C_{\text{inf luyente}}} \times 100$).

Tabla 3.11. Matriz experimental y respuestas de eficiencia del separador piloto.

Corrida	Valor del factor						Eficiencia	
	A	B	D	G	H	N	[GyA] mg/L	E (%)
1	-	-	-	-	-	-	98.4	76.8
2	-	-	-	-	+	+	76.3	82.0
3	-	-	+	+	+	-	101.7	76.1
4	-	-	+	+	-	+	99.6	76.6
5	-	+	+	-	-	-	112.3	73.6
6	-	+	+	-	+	+	89.6	78.9
7	-	+	-	+	+	-	122.2	71.2
8	-	+	-	+	-	+	104.4	75.4
9	+	+	-	-	-	+	133.5	68.6
10	+	+	-	-	+	-	134.4	68.4
11	+	+	+	+	+	+	131.5	69.1
12	+	+	+	+	-	-	123.3	71.0
13	+	-	+	-	-	+	107.9	74.6
14	+	-	+	-	+	-	96.5	77.3
15	+	-	-	+	+	+	104.1	75.5
16	+	-	-	+	-	-	108.0	74.6

Como se puede ver en la tabla anterior, al variar las configuraciones, la eficiencia del separador piloto oscila desde 69 % hasta un máximo de 82 %.

Las eficiencias obtenidas sobrepasan rotundamente la eficiencia de 30.9 % que se podría esperar para el efluente modelo, considerando el criterio de diseño del A.P.I. de 150 μm .

También se puede observar que, aún cuando el influente tenía una fuerte proporción de gotas finas, varias de las configuraciones permiten alcanzar el límite de 100 mg/L que establece la normatividad mexicana (NOM-002-ECOL-1996).

Para definir cuáles son los parámetros que más influyeron en la eficiencia del separador, se aplicó un análisis de varianza idéntico al análisis que se realizó para evaluar la hidrodinámica del separador. En este análisis estadístico se consideró como variable de respuesta a la eficiencia (E (%)).

La Figura 3.19 muestra los resultados del análisis de varianza (suma de cuadrados, *SC*, de cada contraste) de la eficiencia del separador.

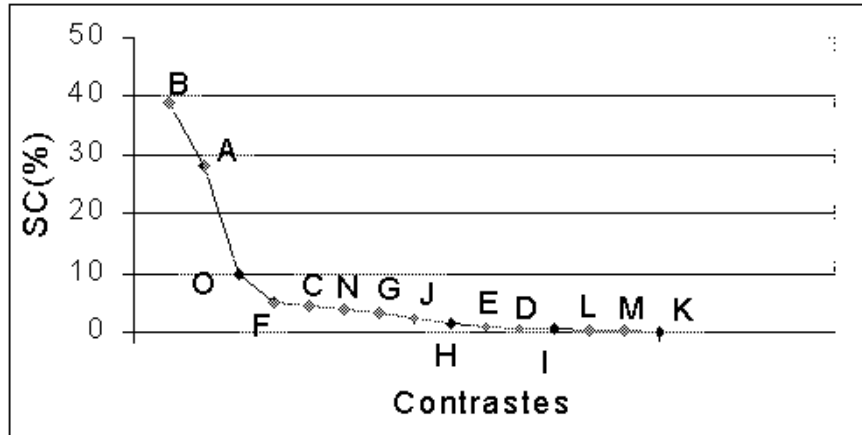


Fig. 3.19. Resultados del análisis de varianza del plan estadístico para la evaluación de la eficiencia del separador piloto.

El análisis estadístico reveló que los factores que más influyen en la eficiencia del separador piloto son, en orden de importancia, B, A y O; sin embargo, O es un contraste producido por la interacción que existe entre los factores A y N, por lo que se podría considerar que los factores más significativos son B, A y N.

Con base en lo anterior, la profundidad o altura del separador (factor B), el tipo de vertedor de entrada (A) y el porcentaje de penetración de la mampara de separación (N), son los parámetros operativos que tienen una mayor incidencia en la eficiencia del separador.

Los factores B, A y N y sus interacciones explican 75 % de la variabilidad de la eficiencia del separador.

Para determinar cuál es la combinación más favorable de estos tres parámetros, se presentan los datos en el diagrama de respuesta de la Figura 3.20 (eficiencia en función de los dos niveles combinados de A, B y N).

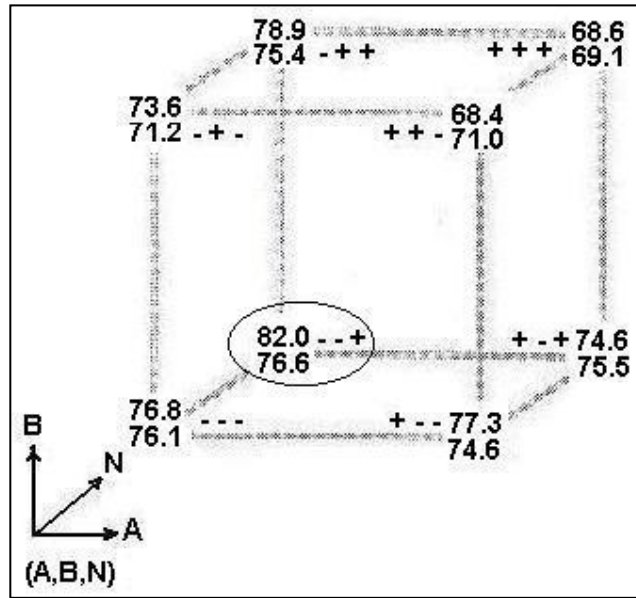


Fig. 3.20. Diagrama de respuesta de la evaluación de la eficiencia del separador.

Como se puede observar en la Figura 3.20, la mejor eficiencia es la que presenta la configuración $(A,B,N)=(-, -, +)$, la cual alcanza una eficiencia de hasta 82%.

La misma gráfica muestra que, en todos los casos, salvo en la combinación $(-, +, +)$, el separador presenta una mayor eficiencia cuando opera con el parámetro B- (profundidad de 40 cm) que cuando funciona con el valor B+ (profundidad de 55 cm). Ésto concuerda con los resultados de las pruebas batch, en las que la profundidad de 0.40 m presentó, en algunos casos, ligeramente una mejor eficiencia que la profundidad de 0.55 m (ver Figuras 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18).

Con el factor A sucede algo similar, ya que la mayoría de las combinaciones que presentan un valor A- (vertedor rectangular en la entrada), tienen una mayor eficiencia que las configuraciones de A+.

El factor N influye favorablemente en la eficiencia del separador únicamente en las configuraciones en las que se combina con el valor de A-. Cuando esto sucede, el parámetro N aumenta significativamente la eficiencia al pasar de N- a N+ (penetración de la mampara de separación de 50 %).

Esto último refleja directamente la interacción que tienen estos dos factores, interacción que se reflejó en el análisis de varianza.

Por lo tanto, los parámetros operativos que más favorecen que el separador piloto de grasas y aceites opere con una alta eficiencia son: altura o profundidad del agua de 40cm (B-), vertedor de entrada rectangular (A-) y penetración de la mampara de separación del 50 % (N+), combinación (A-, B-, N+). Las demás variables D, G y H no tienen influencia significativa (longitud del separador, posición de la mampara de retención y tipo de vertedor de salida).

La eficiencia de las dos corridas adicionales fue de 65.6 % cuando la corrida No. 14 se modificó para probar el vertedor rectangular múltiple en la entrada, y de 81.4 % para la prueba que se realizó con el vertedor con tres orificios.

La eficiencia de la corrida 14 original fue de 77.3 % y, como se puede corroborar, la superó la prueba adicional con el vertedor de entrada de tres orificios. Por lo que, este vertedor es otra alternativa que favorece significativamente la eficiencia del separador piloto.

Se hace notar que el resultado de la hidrodinámica se contrapone a lo que se observó aquí, porque, para la hidrodinámica, el vertedor rectangular múltiple era más favorable que el vertedor con tres orificios.

Estos resultados que parecen contradictorios podrían atribuirse al hecho de que las corridas complementarias se realizaron con planes de tipo “cambiando un sólo factor a la vez”, sustituyendo un vertedor por otro. Una de las desventajas conocidas de los planes del tipo “un factor a la vez”, es justamente que pueden arrojar resultados contradictorios cuando las combinaciones no se evalúan de forma sistemática. Por lo anterior, estos resultados deben considerarse como parciales.

El desempeño del vertedor con tres orificios prácticamente igualó la eficiencia que obtuvo la configuración más eficiente del plan estadístico, lo cual lleva a concluir que, en busca de una mejor eficiencia, podría utilizarse indistintamente el vertedor rectangular o el vertedor con tres orificios para operar el separador piloto.

Al momento de realizar las pruebas, se observó un fenómeno que podría explicar la mayor eficiencia, por lo menos del vertedor rectangular original.

Durante las pruebas, se constató, en las 8 corridas donde se utilizó el vertedor rectangular, el desarrollo de una capa rodante de aceite muy cerca del vertedor de entrada, la cual incrementaba su espesor a medida que avanzaba el tiempo de operación del separador. Se formaba un “rodillo” (cilindro de aceite) en el cual caía directamente el influente, desarrollándose potencialmente un fenómeno de “barrido” de las partículas finas mediante coalescencia.

El “rodillo” de aceite giraba debido al impulso que le producía la descarga del influente modelo, de tal manera que las partículas de aceite al ingresar tenían un contacto directo con el aceite removido, ésto pudo favorecer, por la coalescencia, la remoción de algunas de las partículas de aceite que recién ingresaban al separador, incrementando así la eficiencia del sistema.

En la Figura 3.21 se muestra una fotografía del fenómeno del “rodillo” de aceite durante una de las pruebas.



Fig. 3.21. Fenómeno del “rodillo” de aceite observado con los vertedores rectangulares de entrada.

Por otro lado, el análisis estadístico reveló que el flujo pistón no se desarrolló cuando, en las pruebas hidrodinámicas, el separador piloto funcionó con su longitud más larga (1.90m); además, la eficiencia de remoción de aceite no se incrementó al aumentar la longitud a pesar de que disminuye la carga hidráulica superficial y se incrementa el tiempo de residencia hidráulico nominal del separador.

Para analizar este hecho de manera sistemática, se obtuvieron las gráficas Eficiencia vs Tiempo de residencia hidráulico nominal (TRH o θ) y Eficiencia vs Carga hidráulica superficial de las diferentes pruebas. Dichas gráficas se muestran en las Figuras 3.22a y 3.22b, respectivamente.

En la Figura 3.22a se observa que la eficiencia no presenta relación directa alguna con la magnitud del tiempo de residencia nominal del separador piloto, por lo que se puede

establecer que no existe algún beneficio adicional al operar el separador piloto a un tiempo nominal superior a 18 minutos. Una gráfica similar a la de la Figura 3.22a permitió verificar que tampoco existe una relación sistemática entre el tiempo de medio residencia (t_m) y la eficiencia (Fig. 3.23).

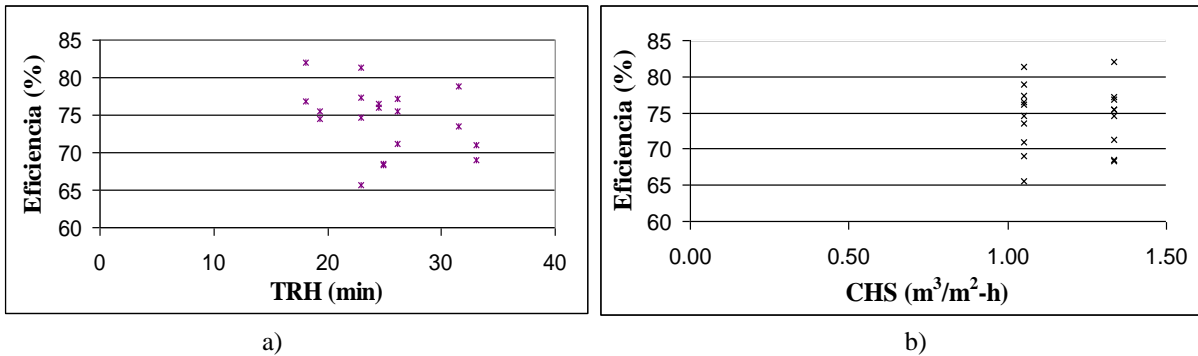


Fig. 3.22. a) Gráfica Eficiencia vs Tiempo de retención hidráulico nominal, b) Gráfica Eficiencia vs Carga hidráulica superficial.

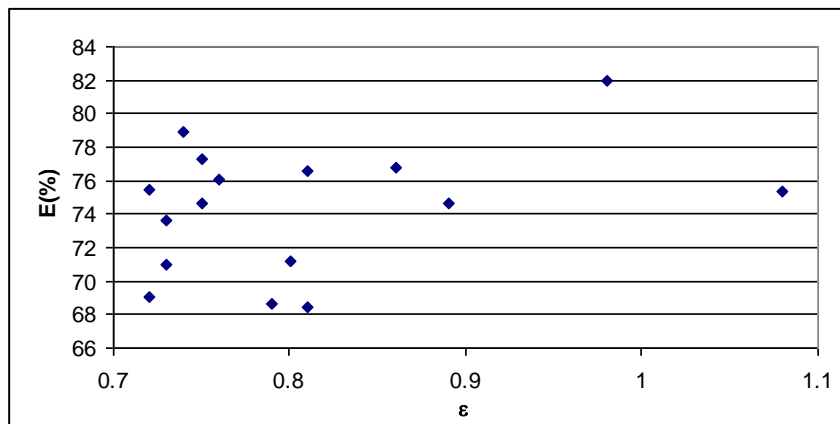


Fig. 3.23. Gráfica ϵ vs Eficiencia del separador piloto.

De la Figura 3.23, se tiene que:

1. Cuando $0.70 < \epsilon < 0.82$ no existe relación alguna entre la eficiencia y el flujo. Parece ser que la eficiencia depende de alguna configuración específica y no del nivel global de ϵ .
2. Cuando $\epsilon > 0.82$, la eficiencia presenta, de manera coherente, los valores más altos.

De igual manera no se observó alguna relación notable entre la eficiencia y la carga hidráulica superficial dentro del intervalo en el que se evaluó el separador piloto (1.05 y $1.33 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$, 25.20 y $32.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$, respectivamente). Lo que significa que cargas hidráulicas superficiales (CHS) inferiores a $1.33 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($32.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$) no mejoran sistemáticamente la eficiencia del separador por encima de lo que se obtuvo con este valor (Figura 3.22b).

Lo anterior podría corroborar, parcialmente, las aseveraciones que hicieron Hafskjold *et al.* (1994), quienes mostraron que la coalescencia podría cobrar importancia en el mecanismo de separación, y mencionaron que podría ser más exacta si se basara el diseño de los separadores convencionales en el tiempo de residencia y no en la carga hidráulica superficial. Los resultados obtenidos aquí corroboran la opinión del equipo de trabajo de Hafskjold sobre la carga hidráulica superficial, dentro del rango estudiado, pero no justifican alguna preferencia para elegir al tiempo de residencia como parámetro de diseño.

Si se consideran los resultados que produjo la prueba batch No. 3 (Figura 3.18), se podrá corroborar que, para el intervalo de estudio de la CHS del separador piloto (1.05 y $1.33 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$, 25.20 y $32.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$, respectivamente), no existe una diferencia notable entre las eficiencias que se pueden obtener con una u otra CHS. La diferencia entre ambas es de tan sólo 2 ó 3%, por lo que es razonable que no se observe alguna tendencia en los datos que presenta la Figura 3.22b. En este rango de CHS, la eficiencia depende mucho más de las configuraciones. Por ejemplo, la Figura 3.22b muestra que para una CHS de $1.05 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($25.20 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$), la eficiencia varía entre 65 y 82 %, dependiendo de la configuración utilizada.

Se debe notar que los resultados de las pruebas en batch se obtuvieron bajo un régimen hidráulico estático (condiciones ideales), muy diferente al que se presenta dentro del separador piloto, por lo que no se debe esperar, sistemáticamente, que el separador piloto alcance las mismas eficiencias que se obtienen con las pruebas batch. De hecho, es satisfactorio, que el separador piloto haya alcanzado en una de sus corridas la eficiencia de 82 %, sólo 4 % inferior a la eficiencia máxima que registró la prueba batch para las mismas condiciones operativas (ver Figura 3.18 con una CHS de $1.3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$, $32.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$).

Esto último refuerza los resultados que establecen que la configuración más eficiente es la que conforman el vertedor de entrada rectangular, el nivel del agua de 0.40 m y la mampara de retención con 50 % de penetración (A-, B-, N+).

Por otra parte, la similitud de las eficiencias confirma que, tanto en la prueba batch 3 como en la evaluación de la eficiencia del separador, se generó la misma distribución

de tamaño de partículas en los dos influentes, es decir, el hecho de que la prueba batch se haya realizado con una concentración de aceite 6 veces mayor no modificó el tamaño de las gotas de aceite generadas.

3.5.3. Optimización del separador piloto

Para obtener una configuración óptima para el separador piloto, se conjugaron tanto los resultados obtenidos de su análisis hidrodinámico, como los de la evaluación de su eficiencia.

Como se recuerda, el análisis hidrodinámico determinó que los parámetros que más favorecen la generación de un flujo pistón dentro del separador piloto son, en orden de importancia, los vertedores de entrada rectangular, la longitud del separador de 1.50 m y el porcentaje de penetración de la mampara de retención de 50 %.

La evaluación de la eficiencia del separador concluyó que la profundidad o altura del separador de 0.40 m, el vertedor de entrada rectangular (o el vertedor con tres orificios) y el porcentaje de penetración de la mampara de separación de 50 %, son los parámetros que tienden a incrementar al máximo la eficiencia del separador piloto.

Las dos series de experimentos coinciden en dos parámetros (vertedor rectangular y penetración de la mampara de retención de 50%) y, cada uno de los análisis introduce una condición adicional deseable, no contradictoria una de otra (el análisis hidrodinámico propone a la longitud de 1.50 m y la evaluación de la eficiencia a la profundidad de 0.40 m).

Si se combinaran los efectos de los dos análisis sería conveniente considerar una configuración para el separador que contemplara como vertedor de entrada al vertedor rectangular, la mampara de separación al 50 % de su penetración, la longitud de 1.50 m y profundidad de 0.40 m. Los otros dos parámetros (tipo de vertedor de salida y posición de la mampara de retención) pueden tener cualquier valor, ya que el efecto que producen en el desempeño del sistema no es muy significativo.

Para completar la combinación óptima básica y, por facilidades constructivas, se eligió como vertedor de salida al vertedor que tiene dos tubos, porque recolecta el agua tratada en la parte inferior del separador. Finalmente, se decidió que la mampara de retención se colocara a 40 cm del final del separador, para que no entorpeciera el trabajo del vertedor de salida con tubos, porque si se hubiera colocado a sólo 20 cm se favorecería la expulsión de las partículas de aceite, debido a que la distancia horizontal

entre la parte baja de la mampara y la ubicación de los tubos de salida del vertedor sería de aproximadamente 10 ó 12 cm.

Con base en todo lo anterior, se determinó que la configuración óptima básica del separador es: longitud de 1.50 m, vertedor rectangular en la entrada, altura del separador o profundidad de 0.40 m, mampara de retención a 40 cm de distancia con respecto a la salida, porcentaje de penetración de la mampara de separación de 50 % y vertedor con tubos en la salida del sistema.

La configuración anterior no corresponde a alguna de las configuraciones analizadas previamente, por lo que fue importante evaluar tanto su hidrodinámica como su eficiencia.

A la configuración óptima básica se le anexaron un par de accesorios con la finalidad de analizar algún posible incremento adicional en la eficiencia del separador piloto de grasas y aceites.

Los aditamentos extra fueron: una pantalla de acrílico de 6 mm de espesor de 30 cm de ancho por 35 cm de altura que se colocó exactamente en la parte media del separador, y un paquete de placas paralelas de 30 cm de ancho construido con acrílico de 3 mm.

La Figura 3.24 presenta la configuración óptima básica del separador, en dicha ilustración se muestran los dos accesorios adicionales evaluados (pantalla intermedia y placas paralelas).

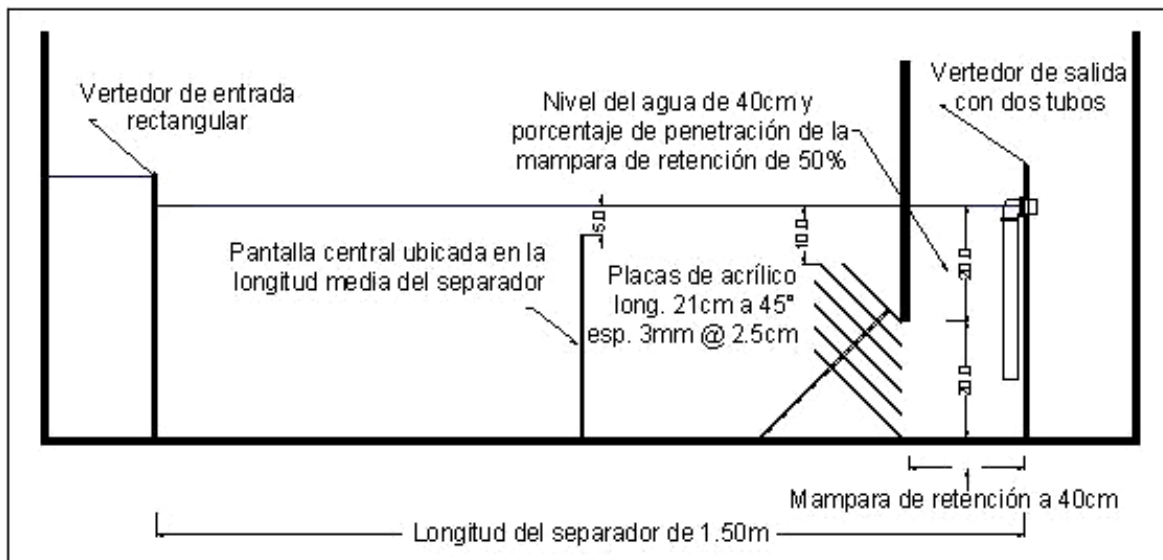


Fig. 3.24. Configuración óptima básica del separador y sus dos accesorios adicionales.

El diseño de las placas paralelas se realizó considerando, según los criterios de diseño para separadores con placas paralelas con flujo descendente, un espacio entre placas de 2.54 cm y una inclinación de 45° con respecto al fondo del canal.

La longitud del paquete de placas paralelas se determinó geoméricamente, considerando que dicho paquete debería terminar exactamente debajo de la proyección vertical de la mampara de retención e iniciar en una posición que permitiera una distancia vertical de 10 cm entre la placa paralela más alta y el nivel del agua.

La pantalla vertical de 35 cm de altura que se ubicó en la parte media del separador, se colocó con el objetivo de favorecer el ascenso de las partículas de aceite a la superficie del agua, y con ello, su eliminación, además de que se crea un separador con dos cámaras en serie.

Se determinó que la distancia de 5 cm entre el nivel máximo del agua y el punto más alto de la mampara central era suficiente para mantener un escurrimiento suave. La velocidad promedio por encima de la pantalla fue de 0.011 m/s (1.11 cm/s ó 66cm/min), velocidad inferior a la velocidad horizontal máxima permisible de 90cm/min que establecen los criterios del API (1990).

La configuración óptima básica del separador se combinó con los dos elementos adicionales y con ellos se obtuvieron cuatro configuraciones, como resultado de un plan factorial completo de dos factores y dos modalidades (como se presentó en la metodología).

Las cuatro configuraciones finales se analizaron hidrodinamicamente y se evaluó también la eficiencia de cada una de ellas para eliminar las gotas de aceite presentes en el influente modelo, de la misma forma, las variables de respuesta fueron ε y E(%).

Los resultados tanto del análisis hidrodinámico como de la evaluación de la eficiencia de las cuatro configuraciones finales se muestran en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Resultados del análisis del tiempo de residencia y de la evaluación de la eficiencia del proceso de optimización del separador piloto.

No. Prueba Final	Descripción de las combinaciones del plan	Análisis del tiempo de residencia			Eficiencia	
		t_m min	θ min	$\varepsilon=t_m/\theta$	[GyA] mg/L	E %
1	Óptima básica (-1, -1)	16.5	19.1	0.86	86.4	79.7
2	Óptima básica con placa divisoria (+1, -1)	16.3	19.1	0.85	58.3	86.3
3	Óptima básica con placas paralelas (-1, +1)	13.9	19.1	0.73	120.1	71.8
4	Óptima básica con placas paralelas y placa divisoria (+1, +1)	17.3	19.1	0.90	212.7*	50.0

*. Promedio de dos replicas de 204 y 221mg/L.

El sistema operó con una carga hidráulica superficial constante de $1.33 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ($32.0\text{m}^3/\text{m}^2\text{-d}$) y un tiempo de residencia hidráulico nominal de 19.1 min.

Es de suma importancia resaltar el buen desempeño que presentó la configuración óptima básica, tanto hidrodinámicamente como en su eficiencia.

En la Tabla 3.12 se puede notar que la configuración óptima permitió que el influente modelo tratado tuviera una concentración de grasas y aceites de 86.4 mg/L (eficiencia de casi 80 %), valor que sólo superó la concentración de la corrida 2 del plan estadístico de 16 ensayos (76.3 mg/L con una eficiencia del 82 %), el cual se aplicó para evaluar la eficiencia del separador.

Al repetirse la eficiencia obtenida con la configuración óptima básica, los resultados de la prueba final No.1 (Tabla 3.12) confirman que el proceso de optimización realizado con los dos análisis de 16 ensayos fue el adecuado. Se logró un comportamiento hidrodinámico muy favorable, y una alta eficiencia de aproximadamente 80 %, casi idéntica a la que alcanzó la prueba más eficiente del mismo plan (82 %).

Cuando se colocó la pantalla central (prueba final 2), el influente tratado presentó una concentración de 58.3 mg/L e incrementó la eficiencia del separador a 86 %. En las pruebas finales No. 1 y 2 el efluente tratado respetó los límites máximos permisibles que marca la normatividad mexicana (DOF, 1998).

El sistema de placas paralelas decreció considerablemente la eficiencia. Al colocar este elemento en la configuración óptima básica, la eficiencia cayó hasta 71.8 % en la prueba final 3, registrando una concentración de 120.1 mg/L de grasas y aceites. Del mismo modo en la prueba final 4, en la que se colocó el módulo de placas, el efluente presentó una concentración de grasas y aceites relativamente alta de 212.7 mg/L y una baja eficiencia de 50 %. Los efluentes tratados con las pruebas que operaron con el sistema de placas paralelas no respetaron los límites máximos permisibles.

En la Figura 3.25 se representan los diagramas de respuesta superpuestos de la evaluación hidrodinámica y de la eficiencia de las cuatro pruebas finales complementarias. Los valores en porcentaje corresponden a la eficiencia, mientras que los decimales se refieren a los valores de ε .

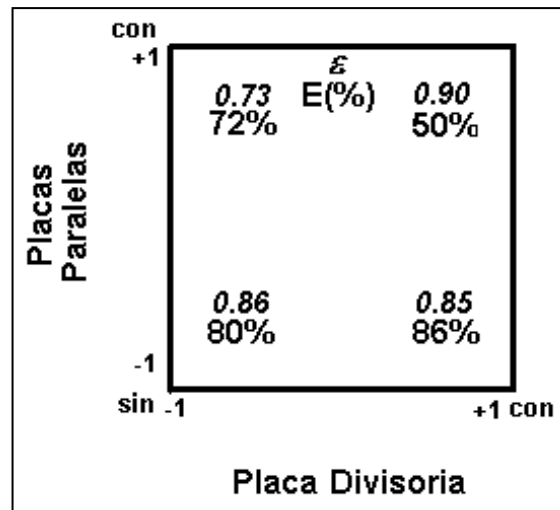


Fig. 3.25. Diagrama de respuesta de las pruebas complementarias.

La mejor eficiencia (86%) se obtuvo al añadir la pantalla (sin colocar las placas paralelas) a la configuración óptima básica. La presencia de las placas alteró la remoción, a pesar de que mejoró sensiblemente la hidrodinámica ($\varepsilon=0.90$). Sin ser el más alto, el valor de ε de las pruebas sin placas (0.86) representa un nivel de desempeño hidrodinámico adecuado.

Lo anterior se justifica porque al comparar los ε de las pruebas finales 1, 2 y 4 con respecto a las 16 relaciones t_m/θ del análisis hidrodinámico previo, se observa que las relaciones de las tres pruebas finales se ubican entre los 5 valores más altos, únicamente superadas por las pruebas del plan estadístico que prácticamente igualaron

el desempeño del flujo ideal. La colocación de la pantalla central no interfirió con el flujo que desarrolló la configuración óptima.

Si se analizan los resultados de las cuatro pruebas finales se puede mencionar que la mejor combinación es la que forman la configuración óptima y la pantalla central (prueba final No. 2), ya que el flujo es aceptable ($\varepsilon = 0.85$) y presenta la eficiencia más elevada (concentración de grasas y aceites en el caudal tratado de 58.3 mg/L).

Del mismo análisis se observa que las peores combinaciones son las que operaron con el sistema de placas paralelas, porque este elemento afectó en todos los casos la eficiencia del separador.

Para ilustrar la interrelación que existe entre el desempeño hidráulico y la eficiencia de remoción del aceite, se pueden representar los datos en gráficas como las de la Figura 3.26.

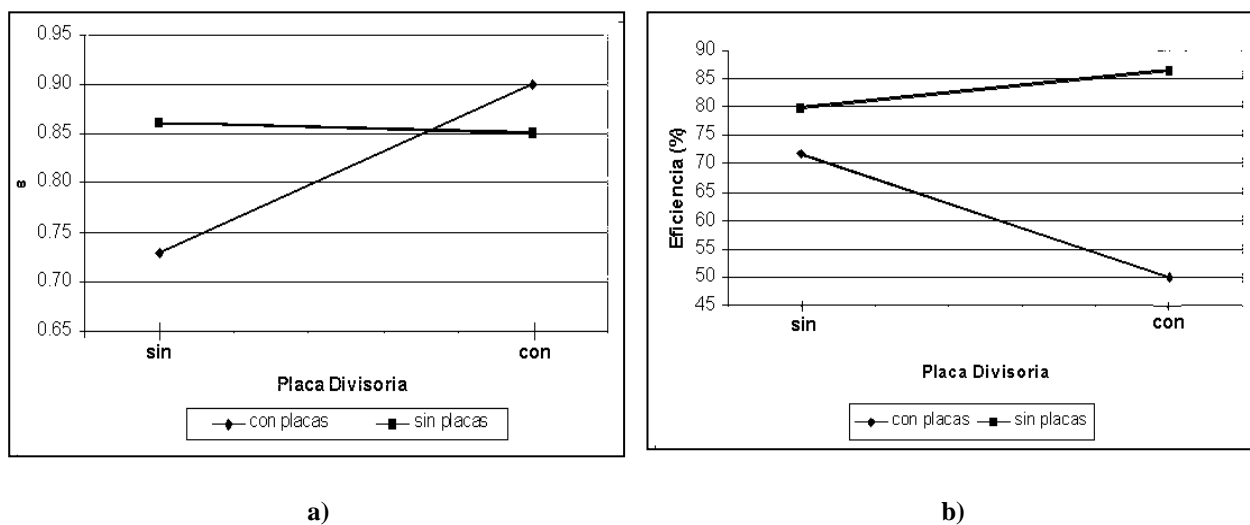


Fig. 3.26. Interrelación entre las placas divisorias y las placas paralelas: a) con respecto a ε , b) con respecto a la eficiencia.

La tendencia que tienen las rectas por intersectarse significa que existen fuertes interacciones entre la placa divisoria y las placas paralelas.

- Sin las placas paralelas la pantalla divisoria mantiene a ε casi constante, lo mismo ocurre con la eficiencia, a la cual incrementa considerablemente
- Con las placas la pantalla aumenta bastante el valor de ε , pero la eficiencia no mantiene la misma tendencia, por el contrario, tiende a deteriorarse

Se observa que un ε elevado no se relaciona siempre con una buena eficiencia, pero para obtener una eficiencia razonable se requiere siempre un ε aceptable. Es decir, la eficiencia alta se asocia siempre con un ε alto, condición necesaria pero no suficiente. Ésto se había manifestado anteriormente cuando se presentó la relación de ε vs E (Figura 3.23).

La contradicción entre la obtención de un excelente flujo pistón ($\varepsilon=0.90$) asociado a una pobre eficiencia de remoción, se ilustra mejor con la prueba final No. 4. Se establece como hipótesis que la causa que generó que la prueba final 4 no presentara la eficiencia más elevada podría estar directamente relacionada con la interacción que tienen la mampara central y el sistema de placas paralelas.

La hipótesis es que al pasar por encima de la pantalla, el flujo de agua se acelera, arrastrando gotas de aceite y fracciones de la capa de aceite de la superficie hacia las placas paralelas. Una vez que llegan a la entrada de las placas, el aceite arrastrado y las gotas de aceite se vuelven a acelerar debido al estrecho espacio que tienen las placas paralelas y a su ángulo de inclinación. La Figura 3.27 ilustra de manera sencilla esta hipótesis.

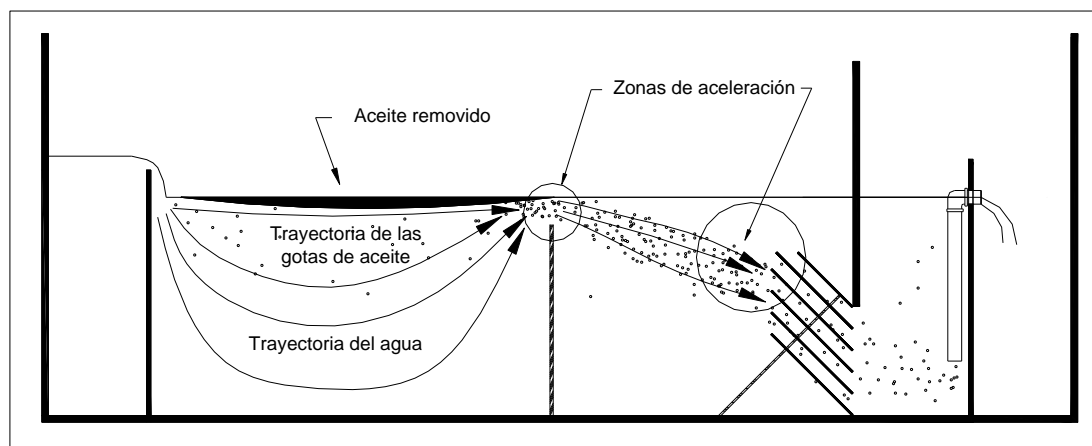


Fig. 3.27. Representación gráfica del posible comportamiento de las gotas de aceite de la prueba final No.4.

Los resultados obtenidos con el sistema de placas paralelas contradice el comportamiento esperado (altas eficiencias de remoción). Sin embargo, es necesario considerar que la evaluación de este sistema dentro del separador piloto no fue muy exhaustiva, por lo que se toma la decisión de considerar los resultados como no concluyentes (por el momento), siendo necesario que en el futuro se analice este elemento con mayores y mejores herramientas.

Por otra parte, se sometió a la prueba de susceptibilidad de separación a una muestra del influente modelo, al final de dicho análisis la muestra de agua contenía solamente 54.3 mg/L de aceites y grasas, es decir, alrededor de 13 % de la concentración inicial del influente (425 mg/L) no podía removerse. La concentración de salida de la prueba final No. 2 (58.3 mg/L) establece que la configuración de esta prueba operó prácticamente a la máxima eficiencia posible que puede tener un separador convencional. Lo cual resalta que la configuración complementaria No. 2 es la configuración óptima del separador piloto para tratar el influente modelo.

La Figura 3.9 señala que aproximadamente el 13 % de las partículas de aceite que contiene el influente modelo son inferiores a 20 μm . Por lo tanto, se puede concluir que la configuración óptima básica del separador piloto de grasas y aceites, en conjunto con la pantalla intermedia, conforman el diseño óptimo del separador, el cual puede remover, con un tiempo medio de residencia de 16.3 min y un gasto de 10 L/min (0.17L/s), partículas de aceite del influente modelo de hasta 20 μm

Por lo tanto, la eficiencia del separador piloto de grasas y aceites se relaciona directamente con el porcentaje de partículas menores de 20 μm que contenga el influente a tratar. Para este caso en particular, el influente modelo contenía 425 mg/L de grasas y aceites con un 13 % de partículas menores de 20 μm , es decir, con aproximadamente 55 mg/L remanente no susceptible de ser eliminado mediante flotación libre.

Algunas observaciones permitieron confirmar que al incrementar la concentración de aceite en el influente generado con el método que establece la ASTM, la distribución del tamaño de partículas se mantiene casi constante desde el punto de vista proporcional, en otras palabras, se conservan los porcentajes de partículas de cada tamaño.

Tomando en cuenta lo anterior, se puede establecer que siempre el 13% de las partículas del influente generado con ese sistema de mezcla serán menores de 20 μm , de tal manera que, el influente a tratar podrá tener casi 770mg/L de aceite y, aún así, el separador piloto respetará el límite máximo permisible instantáneo de 100 mg/L que establece la normatividad mexicana.

Es muy importante que en el futuro se realicen diversas pruebas para analizar el desempeño del separador ante mayores concentraciones de sustancias oleosas.

3.5.4. Consideraciones generales para instalar el separador piloto en campo

Antes de instalar el separador piloto en un taller automotriz, será necesario que se analice minuciosamente la aplicación de alguno de los métodos clásicos de escalamiento (dinámico o geométrico), para asegurar que el separador operará, teóricamente y desde el punto de vista hidrodinámico, de una manera adecuada y similar a las condiciones bajo las cuales se evaluó en laboratorio.

Para llevar a cabo el escalamiento del separador, es importante que se determinen de una manera precisa los caudales de operación que deberá tratar en campo.

La cuantificación de los caudales que generan los talleres (presentados en el capítulo 3.1.3 del presente trabajo) hace pensar que el separador piloto se evaluó con volúmenes de aguas muy similares a los que producen estos establecimientos, por lo que se puede considerar que sus dimensiones originales no sufrirán cambios radicales.

Se debe considerar que el separador piloto presentó eficiencias razonablemente buenas al interactuar con el influente modelo reconstituido, el cual, por el tamaño de las partículas que contenía (diámetro medio de 73 μm , con 69% inferiores a 150 μm) fue un efluente exigente para el separador piloto convencional. Sin embargo, es importante evaluar el comportamiento del separador ante efluentes reales de talleres para confirmar su eficiencia.

Antes de instalar el separador, será importante sugerir el empleo de algunos jabones y desengrasantes que no produzcan altas emulsificaciones. Además, se deberá incrementar el tamaño de la cámara inicial para que pueda servir como trampa de sólidos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Es falsa la hipótesis que dice que sistemáticamente los separadores que tratan aguas jabonosas de talleres tienen remociones deficientes, ya que existen ciertos desengrasantes que no forman emulsiones significativas y permiten que los separadores registren eficiencias razonables.

2. La mayoría de los talleres automotrices de Toluca carecen de un sistema de pretratamiento para grasas y aceites. Los talleres de lavado y engrasado son los establecimientos que con mayor frecuencia cuentan con este sistema. Sin embargo, se nota que los separadores instalados parecen más grandes de lo necesario.

3. Las características de las aguas residuales de los talleres, en particular de los que se dedican al lavado y engrasado, principales generadores de aguas residuales de este sector, son muy variables, presentando concentraciones de grasas y aceites de 186 a 1060mg/L, sólidos suspendidos totales entre 600-700 mg/L, un pH relativamente estable entre 6.4 y 6.9, y una DQO de 147 a 7814 mg/L. El pretratamiento con un separador convencional es factible cuando se selecciona adecuadamente el desengrasante; por el contrario, los altos niveles de DQO, aún en el efluente pretratado, son una potencial fuente de malos olores cuando se quiere reutilizar el agua sin procesos complementarios de tratamiento.

4. Los sistemas de lavado que se utilizan en los talleres de servicio de Toluca generan un caudal promedio de agua de 14.3 L/min (0.24 L/s) por cada toma (máximo 36L/min, 0.60 L/s; mínimo 5.3 L/min, 0.09 L/s). Se utilizan en promedio cerca de 50 L de agua para los autos chicos y 170 L por camioneta para el lavado simple de las carrocerías. Estos volúmenes ascienden, cuando se realiza el servicio completo de lavado y engrasado, a 190 L para autos chicos, 300 L para camionetas, 690 L para camiones de 10 ton y hasta 1100 L cuando se requiere darle servicio a un tractocamión con remolque tipo cama baja. El uso de cubetazos incrementa exageradamente el consumo de agua. En todos los casos, el caudal promedio (caudal igualado considerando todo el tiempo que dura el servicio) se ubica entre 2.5 y 5.6 L/min (0.04 y 0.09 L/s) por auto.

5. Los talleres de reparación de radiadores generan volúmenes de agua residual aproximados de 150 a 216 L cada semana, los cuales provienen de su tanque de pruebas de hermeticidad. Las grasas y aceites que contienen los efluentes que producen es bajo (40 a 185 mg/L), siendo muy altos la conductividad (860 a 7000 μ S/cm), los sólidos suspendidos (260-2330 mg/L) y la DQO (960 a 1300 mg/L).

6. El aceite Quaker State HD SAE 60 para motores a gasolina se seleccionó como aceite modelo para evaluar el separador piloto porque su densidad relativa (0.911 a 10° C) se comparaba con los valores más densos de los aceites usados

7. Con un tubo de 10 cm de largo y un diámetro interno de 0.32 cm, se logró producir, repetitivamente, un influente reconstituido (10 L/min) con gotas de aceite con un diámetro promedio de 73 μm , con 69 % de ellas inferiores a 150 μm y 39 % menores de 50 μm . El sistema de mezcla aceite/agua empleado, genera una distribución de partículas proporcionalmente muy uniforme, independientemente de la concentración de aceite que se dosifique.

8. Para el influente modelo estudiado no hubo correlación alguna, dentro de los rangos estudiados, de la eficiencia del separador piloto con el tiempo de residencia hidráulico (tiempos medios de residencia menores a 18 min), ni con la carga hidráulica superficial (CHS de 1.05 y 1.33 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-h}$, 25.20 y 32.0 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ respectivamente). Se probó que este comportamiento es coherente comparado con los resultados de las pruebas batch, considerando que el intervalo de estudio es una zona muy estrecha donde los incrementos de la eficiencia son apenas perceptibles. El único parámetro responsable de las variaciones de la eficiencia en esta zona es la configuración adoptada.

9. Un ϵ elevado ($\epsilon > 0.85$) es una condición necesaria, pero no suficiente para que el separador piloto tenga una alta eficiencia de remoción de aceite.

10. Los estudios multifactoriales permitieron llegar a una configuración óptima básica del separador piloto de grasas y aceites para tratar el efluente modelo (10 L/min), esa configuración es: longitud de 1.50 m, vertedor de entrada rectangular, vertedor de salida con dos tubos, nivel del agua de 0.40 m, mampara de retención colocada a 40 cm del vertedor de salida con una penetración de 50%, y una placa divisoria de 0.35 m perpendicular al flujo colocada exactamente a 0.75 m del vertedor de entrada. Adicionalmente se debe recordar que el separador tiene un ancho de 0.30 m. La configuración óptima del separador piloto opera a la máxima eficiencia posible (a 80% sin la placa divisoria y a 86% con la placa).

11. De acuerdo con el criterio de diseño del A.P.I. (diámetro de partícula de diseño de 150 μm), el separador piloto convencional de grasas y aceites, en su configuración óptima, sobrepasó la máxima eficiencia que se podría esperar al tratar el efluente reconstituido (más de 80 % contra 30.9 % si se toma como referencia el porcentaje de partículas superiores a 150 μm). La remoción lograda en el tratamiento continuo fue muy coherente y cercano al máximo previsto con los ensayos batch.

RECOMENDACIONES

1. Es necesario que el separador piloto de grasas y aceites sea instalado y evaluado en campo con caudales reales.
2. Para tratar las aguas residuales que producen los talleres automotrices de la Ciudad de Toluca, se podría construir un separador convencional de grasas y aceites, que considere esencialmente las dimensiones y parámetros operativos del separador piloto diseñado en el presente trabajo (ver la configuración óptima del separador piloto). Sin embargo, deben llevarse a cabo las siguientes acciones:
 - 2.1. Realizar un análisis preciso del volumen de aguas residuales que produzca el taller en el que se quiera instalar el separador, con la finalidad de determinar el caudal promedio de aguas residuales. Es necesario prever futuras ampliaciones del establecimiento.
 - 2.2. Considerar la construcción del separador del taller por módulos. De tal manera que, cada módulo sea similar, en cuanto a dimensiones, características y parámetros operativos, al separador piloto de grasas y aceites (ancho de 1.50 m, profundidad de 0.40 m y ancho de 0.30 m).
 - 2.3. Construir un módulo por cada 10 L/min (0.17 L/s) del caudal promedio de aguas residuales que genera el taller en cuestión.
 - 2.4. Evitar que las aguas pluviales ingresen a los módulos que conformarán el separador general del taller, desviándolas hacia otros destinos (preferentemente a áreas verdes).
 - 2.5. Se observó que los separadores remueven gran parte de los sólidos que contienen las aguas residuales producidas en los talleres de lavado y engrasado (hasta 728 mg SST/L o mayores en el caso de talleres de radiadores), por lo que es necesario incrementar la profundidad de la cámara inicial del separador (trampa de sólidos), para que tenga la capacidad suficiente para contener los sólidos que tienen las aguas residuales. Para calcular el incremento será necesario fijar un cierto periodo de mantenimiento y precisar la concentración de SST que contengan las aguas residuales mediante una serie de análisis adicionales de laboratorio.

- 2.6. Además de lo anterior, en la limpieza de los vehículos se deberá utilizar un desengrasante que no produzca altas emulsiones.
3. Se debe realizar un estudio para modelar la trayectoria de las gotas de aceite dentro del separador, con la finalidad de explicar el impacto y el comportamiento de las diferentes configuraciones en la eficiencia de remoción del separador piloto.
4. Es necesario revisar minuciosamente la forma en la que operan los talleres de radiadores, ya que descargan sus aguas residuales directamente al alcantarillado sin brindarles algún tratamiento previo. Estas aguas presentan elevadas concentraciones de algunos contaminantes que provocan que ciertos parámetros alcancen niveles muy altos (DQO, SST y conductividad).

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Aldridge, Thomas D. (1997) Oil/Water Separators: Design, Regulation and Use. *Environmental Technology*. Vol. 7. No. 1. Enero-Febrero 1997. pp. 33-36. USA.
- Alther G.R. (1997). Oils Found in Wastewater, What are They, How to Separate and Eliminate them from Wastewater. Biominc Incorporated, Fendale, MI. 80 páginas.
- APHA, AWWA and WPCF (1989). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 17^a edición. Washington D.C., E.U.
- API (1990). Design and Operation of Oil-Water Separators. Publicación 421. 1^a edición. American Petroleum Institute. Washington D.C., E.U. 43 páginas.
- ASTM (1997). D 1429: Test Method for Specific Gravity of Water and Brine. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 5.01. ASTM, West Conshohocken, V A.
- ASTM (1997). D 6104: Standard Practice for Determining the Performance of Oil/Water Separators Subjected to Surface. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 4.01. ASTM, West Conshohocken, V A.
- CNA (1994) Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro II. Proyecto. 3a. sección: Potabilización y tratamiento. México.
- Crites, R. y Tchobanouglos, G. (2000) Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. 1 ed. Ed. Mc Graw Hill. Colombia.
- Cheikh Fall, Jamal Chaouki, Claude Chavarie and Rosa Elena-Ortega (2002). “Estudio multifactorial de la adsorción del fenantreno en medios complejos de aguas y suelos”, Por publicar en Ingeniería Hidráulica en México, abril-junio 2003. Vol. XVIII, No. 2
- DOF (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, publicada el 24 de diciembre de 1996.

- DOF (1998). Diario Oficial de la Federación. Norma Oficial Mexicana: NOM-002-ECOL-1996, 3 de junio 1998. México, D.F.
- Duke, L. Donald; Chung, Y. Jae (1995) Industrial Storm Water Pollution Prevention: Effectiveness and Limitations of Source Controls in the Transportation Industry. Waste Management (ISSN: 0956-053X) Vol. 15. No. 8. pp. 543-558. E.U.
- Fall C., Díaz C.D., Garcia J. A. y Garcia D. P. (1999). Aplicación de Métodos de Control de la Contaminación Industrial en el Sector de Talleres y Servicios para Automóviles: problemática ambiental y metodología. I Simposium de Vinculación Tecnología - Investigación – Industria. 18 – 19 de Noviembre, Toluca. Memorias p. 94-98.
- Fall, C. (2000). Apuntes de la materia de Operaciones Unitarias. Centro Interamericano de Recursos del Agua. Facultad de Ingeniería. U.A. E M. México.
- Fogler H.S. (1986). Elements of Chemical Reaction Engineering. Capítulos 13 y 14. Ed. Prentice Hall. New Jersey, E.U. 769 páginas.
- Hafskjold B., Morrow T.B., Celuis H.K.B. and Johnson D.R. (1994). Drop-Drop Coalescence in Oil/Water Separation. SPE Technical Conference and Exhibition: Production Operation and Engineering. Vol. Pi, pt 2,pp 203-212.
- Holman, J.P. (1986) Heat transfer. 6a. ed. Ed. Mc Graw Hill. E. U.
- Ilagorre, Raúl, R. y Rivas, Javier M. (2002) Desarrollo de un software de adquisición de datos y control para instrumentos de investigación en tratamiento de aguas y monitoreo en medio ambiente –Adquidatos-UAEM, tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería, UAEM.
- Langerman, Michael A.; Meiners, Matthew J.; Rice, Warren (1996). Proceedings of the 1996 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting Parte 3 de 3. American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publicación) FED V238, No. 3. ASME. Nueva York, EU. pp. 285-292.
- M.P.C.A. (1998) “Self evaluation checklist for automotive service provider. Antifreeze”. Minnesota Pollution Control Agency. Fact sheet. 4.02.

- Matlab (1996). Matlab edición de estudiante. Versión 4.0. Guía del usuario. 1a. ed. Ed. Prentice Hall. España.
- Página de internet: <http://siri.uvm.edu/msds/h/>
- Paxeus, Niklas (1996). Vehicle Washing as a Source of Organic Pollutants in Municipal Wastewater. *Water Science and Technology*. Vol. 33. No.6. pp. 1-8.
- Plackett R.L. y Burman J.P. (1948), “Design of Optimum Multifactorial Experiments”, *Biometrika*, vol. 40, p. 87-104.
- Roseblum, Denise L. (2001) “Reclaim: A dollars-and-cents-analysis”. *Professional Carwashing and Detailing*; 25(2):36-38.
- WEF (1995). Controlling Vehicle Service Facility. Water Environment Federation, Alexandria, VA. E.U.108 páginas.
- Wheeler, D.J. (1990). Tables of Screening Designs. 2ª ed., Ed. SPC Press Inc. Knoxville, Tennessee. E.U. 305 páginas.

ANEXOS

ANEXO A

PRUEBA DE SUSCEPTIBILIDAD DE SEPARACIÓN

Alcance

Esta prueba se realizó para determinar la factibilidad para separar las grasas y aceites presentes en ciertas aguas residuales, mediante la flotación causada por la acción de la fuerza de gravedad y por la diferencia de densidades del agua y de las sustancias oleosas, similar a la forma en la que operan los separadores convencionales de grasas y aceites.

En general, esta prueba consiste en colocar, durante 30 minutos, a una muestra de agua residual dentro de un embudo de decantación. La muestra debe colocarse a la misma temperatura del efluente del cual procede. Al final de los 30 minutos, se eliminan los sólidos depositados en la parte inferior del embudo y se toma una muestra de agua.

Material

Para realizar esta prueba se requiere un embudo de separación esférico con capacidad para 6L de agua.

Procedimiento

Se debe colocar el embudo de decantación cerca del punto de localización del efluente que se desea analizar. La temperatura de la muestra que se colocará dentro del embudo debe mantenerse a la misma temperatura de su efluente de procedencia. Se coloca una muestra de 5L del efluente dentro del embudo y se le permite reposar durante un periodo de 15 minutos. Mientras la muestra reposa, debe girarse dócilmente el embudo para facilitar el depósito de sedimentos. Después de estos primeros 15 minutos, la muestra debe permanecer 15 minutos adicionales en reposo sin que el embudo experimente movimiento alguno.

Al final del periodo de 30 minutos de decantación, cuidadosamente deben eliminarse los sedimentos y el lodo acumulado en la parte inferior, incluyendo una porción del agua que se encontraba ligeramente sobre de ellos. Finalmente, se recolecta una muestra de 1L del agua residual remanente en el embudo, cuidando que la muestra no contenga fracciones del agua acumulada en la parte superior.

La concentración de grasas y aceites de la muestra recolectada al final de la prueba es una medida de la cantidad de grasas y aceites altamente emulsificados, que no pueden removerse tratando su efluente con separadores convencionales de grasas y aceites.

Para completar el análisis es necesario que, antes de iniciar la prueba, se tome una muestra del agua residual con la cual se llenará el embudo, para con ella, determinar la concentración de grasas y aceites del efluente y calcular la fracción de aceite que se encuentra altamente emulsificada.

ANEXO B

DENSIDAD DE LOS ACEITES ANALIZADOS

B.1. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS ACEITES

Alcance

Esta prueba se llevó a cabo para calcular la densidad de los aceites nuevos y usados a las temperaturas deseadas (10 y 15°C).

Material

Balanza analítica Swiss Quality Modelo 205A, CBP 36121.

Copa de acero inoxidable marca Gardco (Figura B.1) que tiene las siguientes características:

Capacidad:	8.321 gramos de agua (25°C).
Dimensiones:	26.5mm de altura por 25.4mm de diámetro.
Peso:	Aproximadamente 39 gramos incluyendo su cubierta.

Esta copa de densidad o densímetro cumple con el método de prueba que marca la norma ASTM D 1429 (ASTM, 1997).



Fig. B.1. Fotografía del densímetro.

Procedimiento

Para analizar las muestras de aceite usado recolectadas, fue necesario llevar a cabo un procedimiento de limpieza de estos líquidos, con la finalidad de remover los sólidos que pudiesen contener. Favoreciendo con ello una determinación exacta de los parámetros y propiedades estudiadas.

De esta manera, las muestras se filtraron utilizando un embudo cerámico para filtración, papel filtro del No. 40, un matraz con salida para vacío y una manguera flexible que se conectó a una de las llaves del sistema para vacío que se encuentra en el Laboratorio de Alumnos del Laboratorio de Calidad del Agua del C.I.R.A., esto último con el objetivo de favorecer la filtración.

Una vez que las muestras se filtraron se colocaron en tubos de ensayo y éstos se introdujeron en frascos con agua potable, los cuales se almacenaron en los refrigeradores del laboratorio hasta alcanzar las temperaturas de análisis (10 y 15°C). En todo momento se mantuvo un termómetro de mercurio dentro de los frascos con agua potable para monitorear la temperatura de las muestras refrigeradas.

Al igual que las muestras de aceite, el densímetro también se colocó en el interior del refrigerador el mismo intervalo de tiempo que éstas.

Al alcanzar las muestras la temperatura de 10°C se extrajeron del refrigerador y se determinó la densidad de cada una de ellas cumpliendo con la siguiente secuencia:

1. Se determinó el peso de la copa de densidad junto con su cubierta. Ambos elementos estaban vacíos y completamente limpios.
2. Se removió la cubierta de la copa y se llenó con premura con el aceite en estudio hasta que la superficie libre del fluido se ubicó a aproximadamente 1.7mm del extremo o altura máxima del densímetro.
3. Cuidadosa y rápidamente para evitar cambios significativos en la temperatura del fluido, se colocó la cubierta de tal forma que el aire y el material en exceso salieron de la copa a través del orificio de ventilación de la cubierta.
4. Con rapidez se limpió la parte superior de la cubierta para eliminar el material expulsado por su ventilación y se verificó que el densímetro se encontrara completamente limpio.
5. Una vez que la copa estuvo completamente libre de cualquier material en su superficie externa, se determinó su peso.

El procedimiento anterior se repitió en diversas ocasiones para un mismo aceite, con el objetivo de minimizar posibles causas de error.

De esta manera, únicamente fue necesario restar al peso de la copa que se encontraba repleta con el material en estudio, el peso de la copa completamente vacía, y se obtuvo así, el peso del material que se encontraba en el interior del densímetro.

Una vez terminado el ensaye, fue necesario limpiar inmediatamente la copa de densidad.

Exactamente la misma secuencia se repitió posteriormente para determinar la densidad de los aceites a la temperatura de 15°C.

Cálculos

Para obtener la densidad del material es necesario tomar en cuenta la siguiente relación:

$$\rho (\text{libras/galónUSA}) = \text{peso en gramos del material contenido en la copa} \quad (\text{B.1})$$

Para obtener el valor de la densidad en kg/m^3 , es necesario multiplicar el valor de la densidad en *libras/gal* por el factor adimensional **119.93**.

Este factor se emplea por la siguiente razón:

$$\frac{\text{libras}}{\text{galónUSA}} \cdot \frac{0.454\text{kg}}{\text{libra}} \cdot \frac{\text{galónUSA}}{3.7854\text{litros}} \cdot \frac{1000\text{litros}}{\text{m}^3} = 119.93 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

B.2. DENSIDAD RELATIVA DE LOS ACEITES ANALIZADOS**Tabla B.1.** Densidad relativa de los aceites analizados.

Nombre del Establecimiento o Marca	Tipo	Procedencia o Uso	Punto de Muestreo	Densidad Relativa			Observaciones
				10°C	15°C	40°C	
GARD	HIGH PERFORMANCE 5W-30, 10W-30, 10W-40	Aceite lubricante para motor.	-	-	-	0.880	
MOBIL OIL	MOTOR OIL 10W-40	Aceite lubricante para motor.	-	-	-	0.877	
QUAKER STATE	HDX UNIVERSAL FLEET MOTOR OIL	Aceite lubricante para motor.	-	-	-	0.870	
TEXACO LUBRICANTS	HAVOLINE MOTOR OIL SAE 10W-30	Aceite lubricante para motor.	-	-	-	0.890	
CHEVRON	CHEVRON DELO 400 PLUS MOTOR OIL SAE 10W-30	Aceite lubricante para motor.	-	-	0.890	-	
VALVOLINE	NAPA MV MOTOR OIL SAE 10W-30	Aceite lubricante para motor.	-	-	0.879	-	
TEXACO	DIESEL FUEL 2	Combustible.	-	-	-	0.852	
TEXACO LUBRICANTS	URSA SUPER PLUS SAE 15W-40	Aceite lubricante para motor.	-	-	-	0.891	
CITGO PETROLEUM	CITGO MP ATF; DEXTRON-IIIE; MERCON; 33-120	Fluido hidráulico para transmisión automática.	-	-	-	0.870	
WITCO CHEMICAL KENDALL	AMALIE DEXTRON II-MERCON ATF	Fluido hidráulico para transmisión automática.	-	-	-	0.870	
BATTENFELD AMERICA INC	MIL-L-21260 GRADO 50	Aceite lubricante para motor.	-	-	-	0.890	
CASTROL	CASTROL GTX SUPER MULTIGRADO SAE 10W-30	Aceite lubricante para motor.	-	-	-	0.850	
CASTROL	CASTROL GTX SUPER MULTIGRADO SAE 5W-30	Aceite lubricante para motor.	-	-	-	0.870	
PETRO CANADA	SUPER PLUS 10W-30, 15W-40	Aceite lubricante para motor.	-	-	-	0.870	

Tabla B.1 (continuación). Densidad relativa de los aceites analizados.

Nombre del Establecimiento o Marca	Tipo	Procedencia o Uso	Punto de Muestreo	Densidad Relativa			Observaciones
				10°C	15°C	40°C	
CHEVRON	DELO 400 SAE 15W-40	Aceite lubricante para motor.	-	-	-	0.890	Los valores de la densidad relativa corresponden a una temperatura de 100°C.
SERVICIO GOÑI	ACEITE	Aceite usado.	Separador del taller.	0.862	0.857	-	Los valores se calcularon a 6°C y a 19°C en vez de 10 y 15°C, respectivamente.
GASOLINERÍA JET	DIESEL PEMEX	Combustible.	Dispensario de la gasolinera.	0.837	0.835	-	
ACEITE QUAKER STATE	15W-40	Aceite lubricante para motor a gasolina.	-	0.884	0.877	-	
TALLER TEO	ACEITE	Aceite usado para motor a diesel.	Medio barril empleado para recolectar el aceite de desecho.	0.855	0.875	-	
SUPERSERVICIO 1-2-3	ACEITE	Aceite usado separado por gravedad.	Nata de aceite de la tercera celda del separador	0.870	0.871	-	La mayoría del aceite se acumula en esta celda.
SUPERSERVICIO 1-2-3	ACEITE	Aceite usado de motor.	Cubeta de recolección.	0.903	0.883	-	Posible estratificación.
SUPERSERVICIO 1-2-3	DIESEL	Diesel para desengrasado.	Pistola de expulsión.	0.835	-	-	Caudal de expulsión de la pistola: 0.16L/min
AUTOSERVICIO XINANTECATL	ACEITE	Aceite usado desechado en el lavado del auto.	Canaleta recolectora del lavado y engrasado.	0.882	0.883	-	Muestra centrifugada para separar sólidos.
AUTOSERVICIO XINANTECATL	ACEITE	Aceite usado del motor de una camioneta CHEVROLET PICK UP 2500.	Directo del carter del motor.	0.911	0.911	-	
AUTOSERVICIO XINANTECATL	ACEITE	Aceite usado del diferencial de un VW SEDAN.	Directo del diferencial del auto.	0.892	0.891	-	
AUTOSERVICIO XINANTECATL	ACEITE	Aceite usado.	Tambo de acopio.	0.897	0.896	-	

Tabla B.1 (continuación). Densidad relativa de los aceites analizados.

Nombre del Establecimiento o Marca	Tipo	Procedencia o Uso	Punto de Muestreo	Densidad relativa			Observaciones
				10°C	15°C	40°C	
AUTOSERVICIO LAZCANO	ACEITE	Aceite usado separado por gravedad.	Compartimiento No.1 del segundo separador.	0.888	0.887	-	
AUTOSERVICIO LAZCANO	ACEITE	Aceite usado separado por gravedad.	Compartimiento No.2 del segundo separador.	0.905	-	-	
AUTOSERVICIO LAZCANO	ACEITE	Aceite usado.	Tambo de acopio.	0.902	0.900	-	
AUTOSERVICIO TOLUCA	ACEITE	Aceite usado separado por gravedad.	Nata del separador del taller.	0.855	0.849	-	
AUTOSERVICIO TOLUCA	ACEITE	Aceite usado separado por gravedad.	Nata del separador del taller.	0.859	0.841	-	
QUAKER STATE	HD SAE 60	Aceite lubricante para motores a gasolina	-	0.901	0.897	-	
QUAKER STATE	SAE 90 GREEN OIL	Aceite para transmisiones	-	0.897	0.893	-	

ANEXO C

DOSIFICACIÓN DEL ACEITE

C.1. CALIBRACIÓN DE LAS BOMBAS DOSIFICADORAS

Para determinar el volumen de aceite que podía conducir cada una de las bombas dosificadoras se llevó a cabo un proceso de calibración de las mismas, para ello se cuantificó el volumen de aceite por minuto (aceite modelo seleccionado) que cada una de ellas podía descargar al aire libre, considerando diversos niveles de operación y su velocidad de desplazamiento.

Posteriormente, se calculó el volumen de aceite por minuto que cada bomba podía dosificar a través del sistema de inyección hacia la tubería principal del sistema hidráulico del separador, midiendo únicamente la velocidad de desplazamiento del aceite.

El volumen de aceite por minuto que pudo dosificar cada bomba al influente del separador se calculó con la fórmula siguiente, la cual se determinó considerando una semejanza de proporciones:

$$q_p = \frac{q_s \cdot v_p}{v_s} \quad (\text{C.1})$$

Donde:

q_p Volumen de aceite por minuto que puede dosificar la bomba en estudio hacia el sistema hidráulico del separador, mL/min

q_s Volumen de aceite por minuto que puede descargar la bomba en estudio al aire libre, mL/min

v_p Velocidad de desplazamiento del aceite cuando se dosifica al sistema hidráulico del separador, cm/s

v_s Velocidad de desplazamiento del aceite cuando se descarga al aire libre, cm/s

Las gráficas de operación de cada bomba se muestran en las Figuras C.1 y C.2. En ellas se observa el caudal de aceite que puede inyectar cada una al sistema hidráulico del separador cuando la bomba principal del sistema se encuentra encendida.

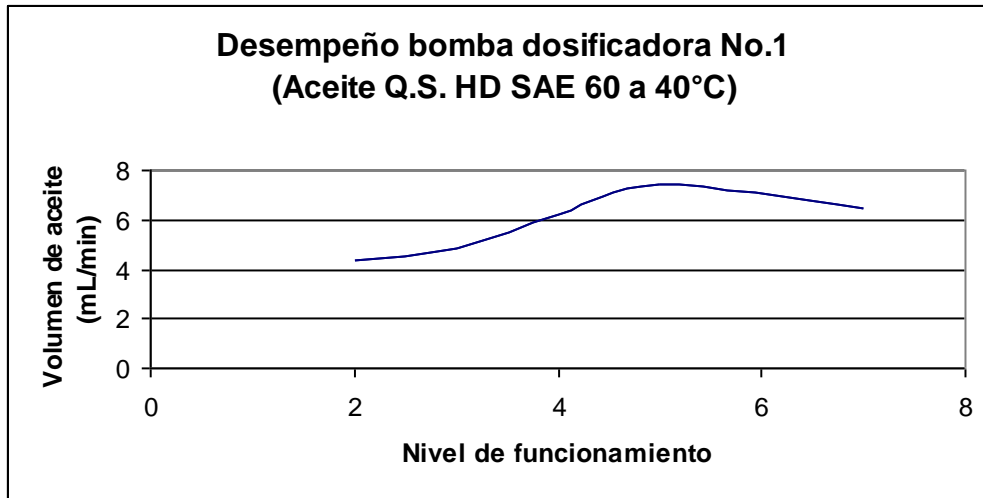


Fig. C.1. Gráfica de calibración de la bomba No. 1.

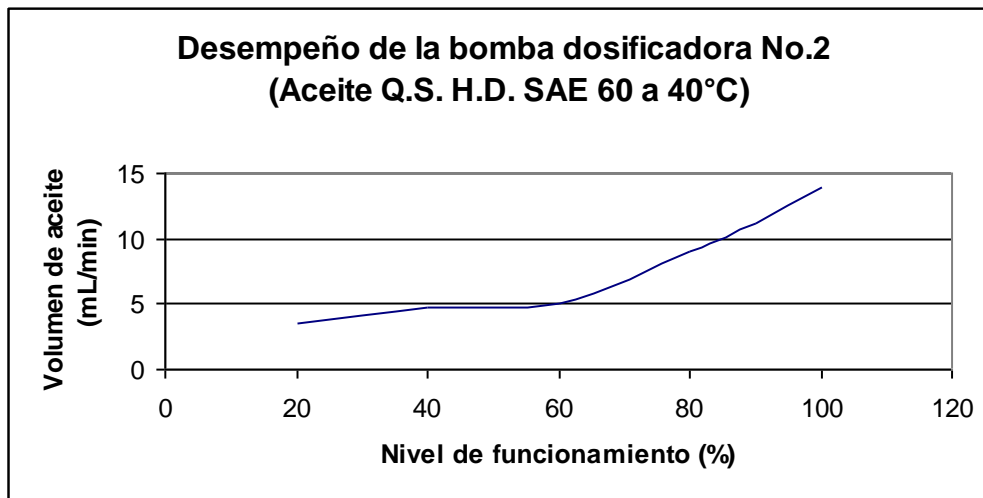


Fig. C.2. Gráfica de calibración de la bomba No. 2.

C.2. CÁLCULO DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO DE LAS GOTAS DE ACEITE

El cálculo del tiempo de enfriamiento de las gotas de aceite es un problema clásico de transferencia de calor, problema que se puede idealizar como un modelo en el que una esfera o gota caliente (aceite a una temperatura de aproximadamente 40°C) se sumerge bruscamente en un líquido que presenta una temperatura inferior a la de la esfera (agua a 10°C).

El cálculo se puede llevar a cabo siguiendo el método de Carslaw y Jaeger (Holman, 1986), para ello se calcula inicialmente un factor que está directamente relacionado con la temperatura inicial (40°C) y final de la gota de aceite (15°C) y la temperatura del líquido en el cual se sumerge súbitamente (agua a 10°C):

$$\frac{T - T_o}{T_1 - T_o} = \frac{15 - 40}{10 - 40} = 0.83 \quad (\text{C.2})$$

Donde:

T Temperatura que alcanzará el centro de la gota de aceite al sumergirse dentro del agua, en °C
 T_1 Temperatura del agua, en °C
 T_o Temperatura inicial en el centro de la gota de aceite, en °C

De la figura 4-8 del libro de Holman (1986), se establece que el valor de la relación $\frac{\alpha \cdot t}{R^2}$ es aproximadamente de 0.30 al centro de la gota de aceite.

Donde:

α Coeficiente de difusividad térmica que depende directamente de la conductividad térmica de la gota de aceite (k) e indirectamente de su densidad (ρ) y de su coeficiente de calor específico (c), en m^2/s
 t Tiempo que tarda la gota de aceite en alcanzar la temperatura de 15°C.
 R^2 Radio de la gota de aceite, en m

Considerando la definición físico-matemática de α descrita en el párrafo anterior, se tiene:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (\text{C.3})$$

Del anexo A-4 del libro de Holman (1986) se determina que, para un aceite automotriz a 40°C, similar al aceite modelo seleccionado:

$$k = 0.144 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \quad \rho = 888.23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad c = 1880 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación de α :

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} = \frac{0.144 \frac{W}{m^{\circ}C}}{888.23 \frac{kg}{m^3} \cdot 1880 \frac{J}{kg^{\circ}C}} = 8.62 \times 10^{-8} \frac{m^2}{s} \quad (C.4)$$

Una vez que se conoce el valor del coeficiente de difusividad térmica, se puede conocer el tiempo que tarda la gota de aceite en enfriarse despejando el valor de t de la expresión $\frac{\alpha \cdot t}{R^2} = 0.30$.

De esta manera,

$$t = \frac{0.3R^2}{\alpha} \quad (C.5)$$

Considerando el radio de la gota de aceite promedio $R=150\mu m$. Entonces el tiempo que tarda una gota de aceite en enfriarse y adquirir la temperatura del agua es de:

$$t = \frac{(0.30)(150 \times 10^{-6} m)^2}{8.62 \times 10^{-8} \frac{m^2}{s}} = 0.078 s \quad (C.6)$$

Por lo cual, la gota promedio de aceite de $150\mu m$ tarda $0.078 s$ en enfriarse de 40 a $15^{\circ}C$, pudiéndose considerar como un cambio de temperatura casi instantáneo, asegurando con ello que el aceite adquiere una temperatura idéntica a la del agua que la contiene antes de entrar a la cámara inicial del separador piloto de grasas y aceites.

ANEXO D

FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA DE LAS CORRIDAS ANALIZADAS

A manera de ejemplo, se muestran a continuación todos los datos, gráficas y cálculos que se realizaron para calcular la función de distribución de los tiempos de residencia de la corrida No. 1 del plan estadístico de la evaluación hidrodinámica (Tabla D.1). Del resto de las corridas únicamente se mostrarán las gráficas de las funciones de distribución $E(t)$.

Cada corrida se registró con el prefijo “RTD”, seguido de su número correspondiente de corrida, al final se agregó una letra “c”, la cual corresponde a un registro interno del estudio. Las pruebas finales se registraron con el prefijo “Prueba f” seguido de su correspondiente número de corrida.

En la Tabla D.1 se muestran, entre otras cosas, los datos originales que se registraron con el software Adquidatos-UAEM (conductividad) de la primera corrida. Se debe recordar que la configuración del separador piloto para esta combinación, registró un tiempo medio de residencia de 649.39 s, es decir, 10.82 min. Las gráficas correspondientes a cada columna de la Tabla D.1 se presentan después de ella.

Tabla D.1. Tabla de cálculo de la corrida No.1.

Tiempo	Conductividad	Conductividad Modificada [C(t)]	C(t)/C _{máxS}	Regresión	E(t)	t E(t)
s	μS	μS	mg/L	C(t)/C _{máxS}	d/dt [C(t)/C _{máxS}]	S
0	453.0	0.0	0.00	-0.10	0.0014	0.00
15	459.1	6.2	0.02	-0.08	0.0014	0.02
30	462.2	9.2	0.02	-0.06	0.0014	0.04
45	459.1	6.2	0.02	-0.04	0.0014	0.06
60	459.1	6.2	0.02	-0.02	0.0013	0.08
75	462.2	9.2	0.02	0.00	0.0013	0.10
90	462.2	9.2	0.02	0.02	0.0013	0.12
105	462.2	9.2	0.02	0.04	0.0013	0.13
120	477.5	24.6	0.06	0.06	0.0013	0.15
135	480.6	27.7	0.07	0.08	0.0012	0.17
150	480.6	27.7	0.07	0.10	0.0012	0.18
165	496.0	43.0	0.11	0.12	0.0012	0.20
180	486.8	33.8	0.09	0.13	0.0012	0.21
195	492.9	40.0	0.10	0.15	0.0012	0.23
210	499.1	46.1	0.12	0.17	0.0012	0.24

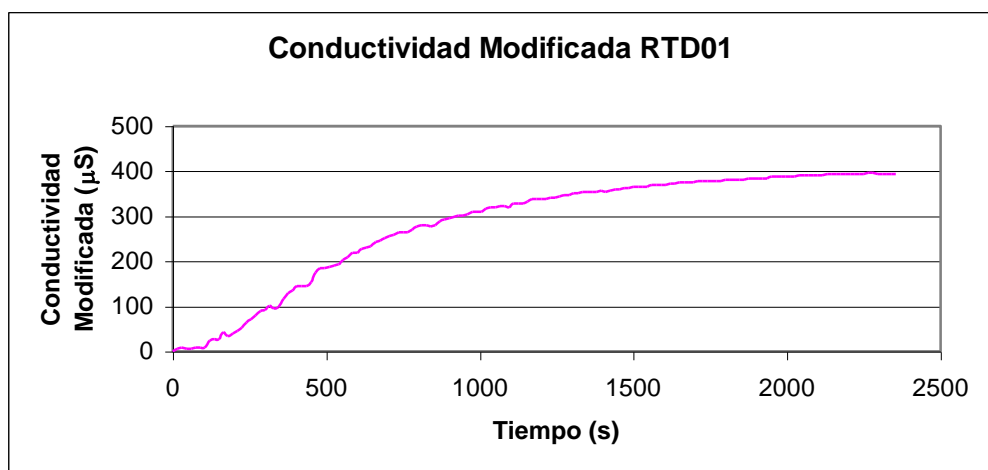
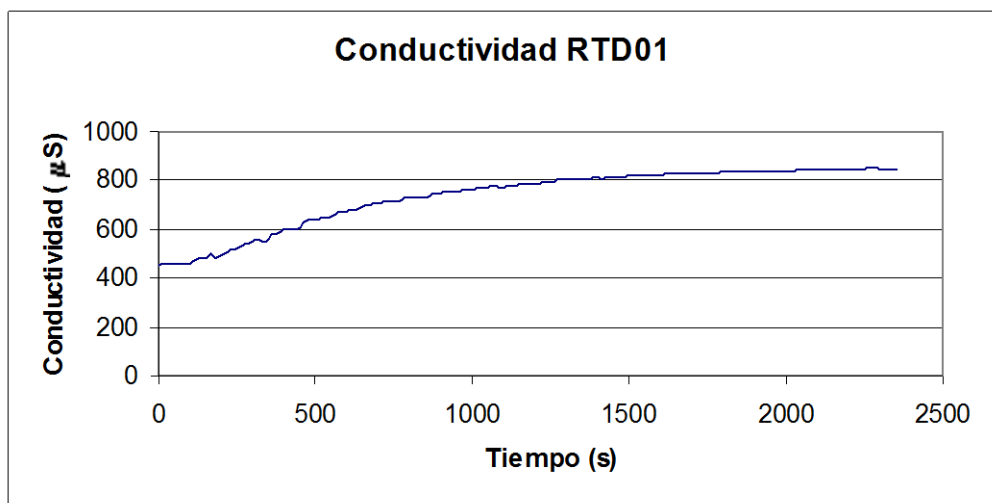
Anexo D. Funciones de Distribución de los Tiempos de Residencia

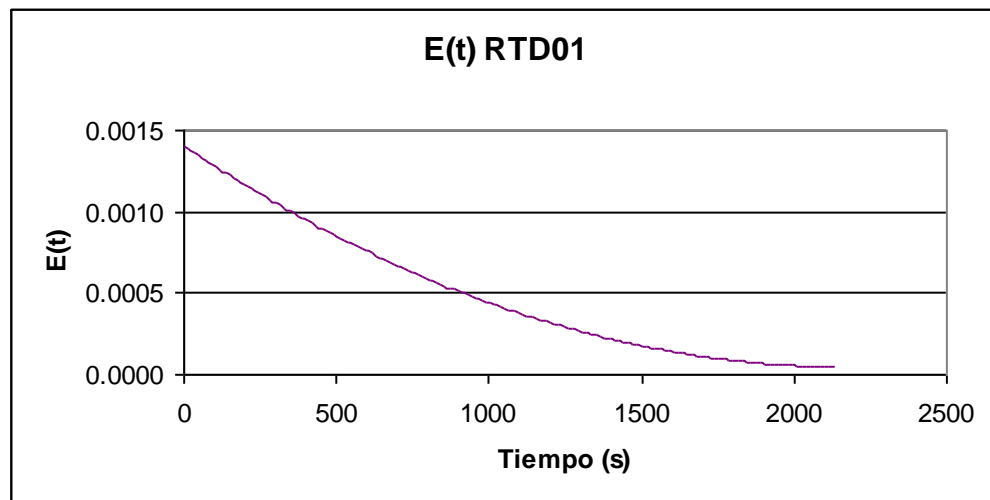
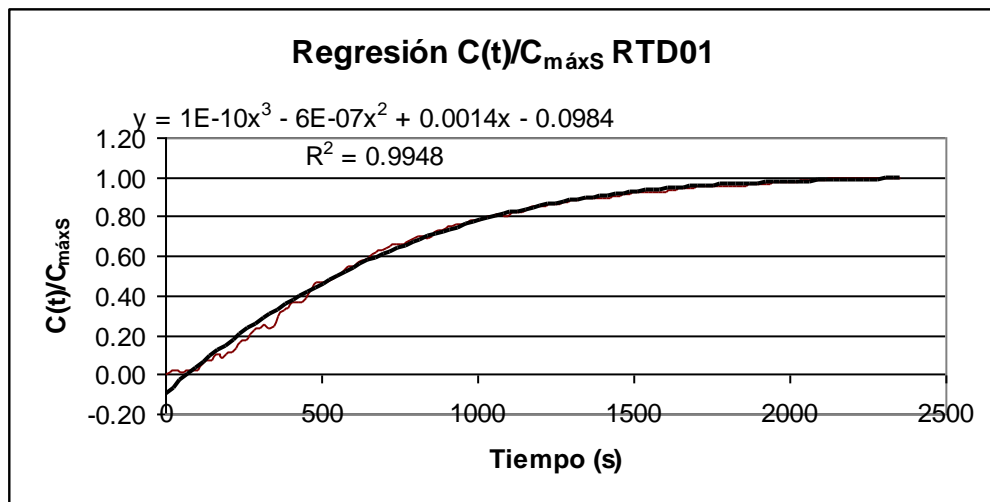
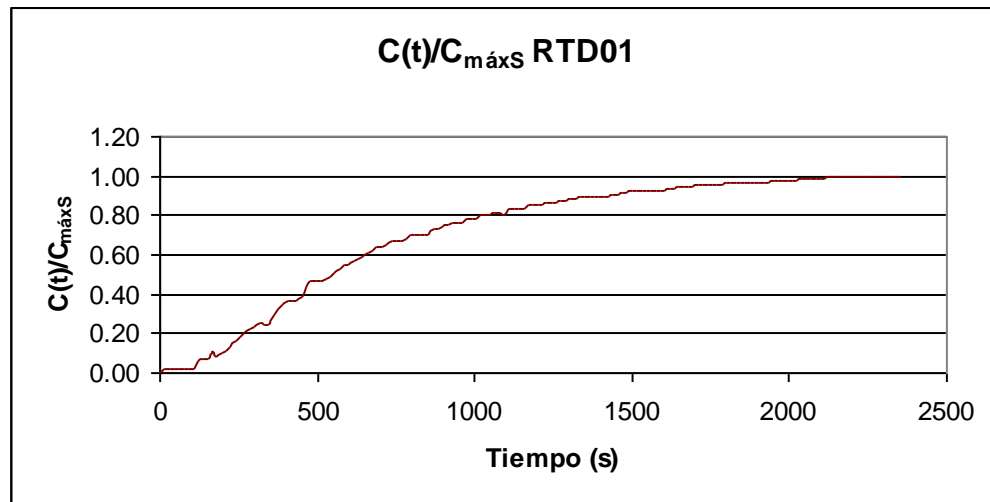
225	505.2	52.2	0.13	0.19	0.0011	0.26
240	517.5	64.5	0.16	0.20	0.0011	0.27
255	523.6	70.7	0.18	0.22	0.0011	0.28
270	532.9	79.9	0.20	0.24	0.0011	0.29
285	542.1	89.1	0.22	0.25	0.0011	0.31
300	545.1	92.2	0.23	0.27	0.0011	0.32
315	554.4	101.4	0.26	0.29	0.0010	0.33
330	548.2	95.3	0.24	0.30	0.0010	0.34
345	551.3	98.3	0.25	0.32	0.0010	0.35
360	569.7	116.8	0.29	0.33	0.0010	0.36
375	582.0	129.1	0.33	0.35	0.0010	0.37
390	588.2	135.2	0.34	0.36	0.0010	0.37
405	597.4	144.4	0.36	0.37	0.0009	0.38
420	597.4	144.4	0.36	0.39	0.0009	0.39
435	597.4	144.4	0.36	0.40	0.0009	0.40
450	606.6	153.6	0.39	0.42	0.0009	0.41
465	628.1	175.2	0.44	0.43	0.0009	0.41
480	637.3	184.4	0.47	0.44	0.0009	0.42
495	637.3	184.4	0.47	0.46	0.0009	0.42
510	640.4	187.4	0.47	0.47	0.0008	0.43
525	643.5	190.5	0.48	0.48	0.0008	0.43
540	646.5	193.6	0.49	0.49	0.0008	0.44
555	655.8	202.8	0.51	0.51	0.0008	0.44
570	661.9	209.0	0.53	0.52	0.0008	0.45
585	671.1	218.2	0.55	0.53	0.0008	0.45
600	671.1	218.2	0.55	0.54	0.0008	0.45
615	680.3	227.4	0.57	0.55	0.0007	0.46
630	683.4	230.5	0.58	0.56	0.0007	0.46
645	686.5	233.5	0.59	0.57	0.0007	0.46
660	695.7	242.8	0.61	0.58	0.0007	0.47
675	698.8	245.8	0.62	0.59	0.0007	0.47
690	704.9	252.0	0.64	0.61	0.0007	0.47
705	708.0	255.1	0.64	0.62	0.0007	0.47
720	711.1	258.1	0.65	0.63	0.0007	0.47
735	717.2	264.3	0.67	0.63	0.0006	0.47
750	717.2	264.3	0.67	0.64	0.0006	0.47
765	717.2	264.3	0.67	0.65	0.0006	0.47
780	723.4	270.4	0.68	0.66	0.0006	0.47
795	729.5	276.6	0.70	0.67	0.0006	0.47
810	732.6	279.6	0.71	0.68	0.0006	0.47
825	732.6	279.6	0.71	0.69	0.0006	0.47
840	729.5	276.6	0.70	0.70	0.0006	0.47
855	732.6	279.6	0.71	0.71	0.0005	0.47
870	741.8	288.9	0.73	0.71	0.0005	0.46
885	744.9	291.9	0.74	0.72	0.0005	0.46
900	747.9	295.0	0.74	0.73	0.0005	0.46
915	751.0	298.1	0.75	0.74	0.0005	0.46
930	754.1	301.1	0.76	0.74	0.0005	0.46
945	754.1	301.1	0.76	0.75	0.0005	0.45
960	757.2	304.2	0.77	0.76	0.0005	0.45
975	763.3	310.4	0.78	0.77	0.0005	0.45
990	763.3	310.4	0.78	0.77	0.0004	0.44
1005	763.3	310.4	0.78	0.78	0.0004	0.44
1020	769.5	316.5	0.80	0.79	0.0004	0.44
1035	772.5	319.6	0.81	0.79	0.0004	0.43

Anexo D. Funciones de Distribución de los Tiempos de Residencia

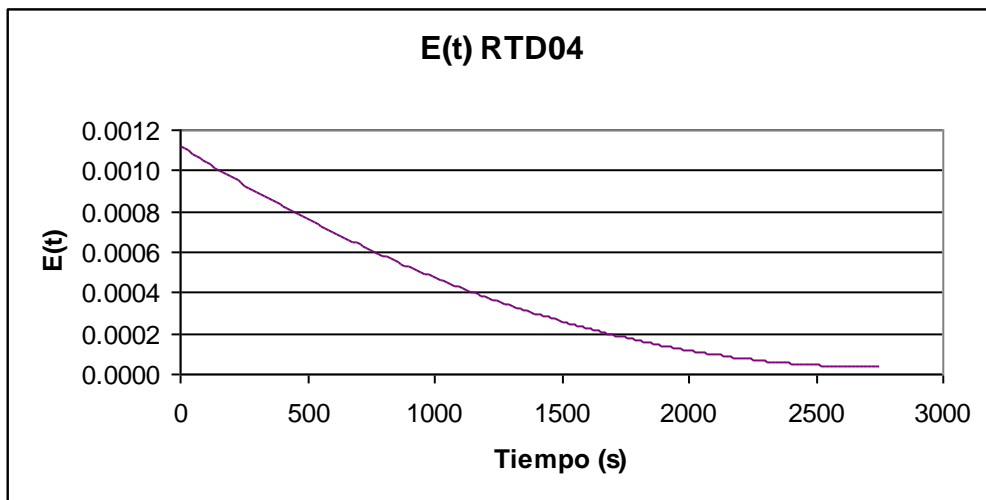
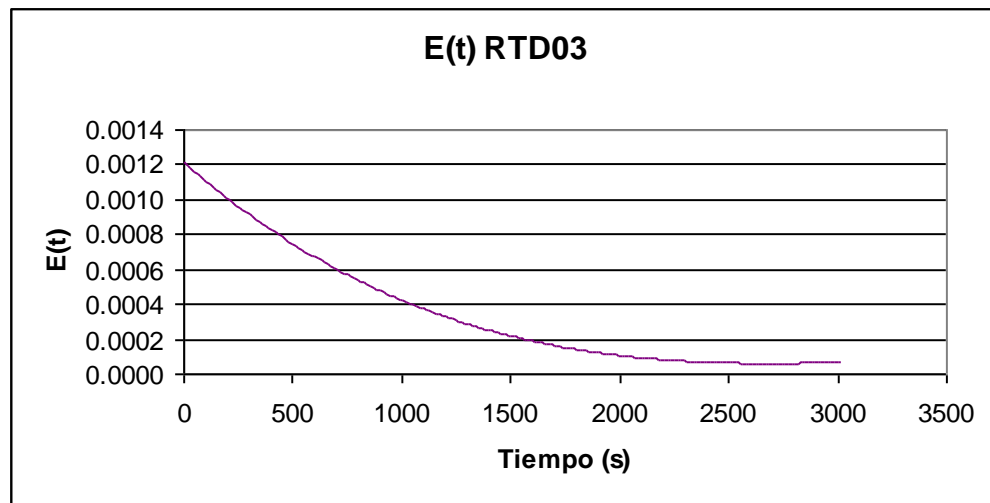
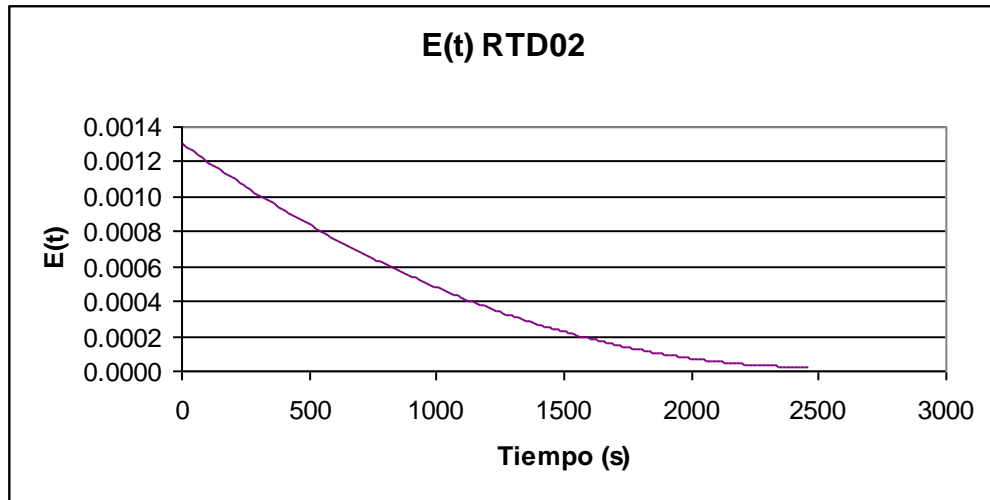
1050	772.5	319.6	0.81	0.80	0.0004	0.43
1065	775.6	322.7	0.81	0.80	0.0004	0.42
1080	775.6	322.7	0.81	0.81	0.0004	0.42
1095	772.5	319.6	0.81	0.82	0.0004	0.42
1110	781.7	328.8	0.83	0.82	0.0004	0.41
1125	781.7	328.8	0.83	0.83	0.0004	0.41
1140	781.7	328.8	0.83	0.83	0.0004	0.40
1155	784.8	331.9	0.84	0.84	0.0003	0.40
1170	791.0	338.0	0.85	0.84	0.0003	0.39
1185	791.0	338.0	0.85	0.85	0.0003	0.39
1200	791.0	338.0	0.85	0.85	0.0003	0.38
1215	791.0	338.0	0.85	0.86	0.0003	0.38
1230	794.0	341.1	0.86	0.86	0.0003	0.37
1245	794.0	341.1	0.86	0.87	0.0003	0.37
1260	797.1	344.2	0.87	0.87	0.0003	0.36
1275	800.2	347.2	0.88	0.88	0.0003	0.35
1290	800.2	347.2	0.88	0.88	0.0003	0.35
1305	803.3	350.3	0.88	0.88	0.0003	0.34
1320	803.3	350.3	0.88	0.89	0.0003	0.34
1335	806.3	353.4	0.89	0.89	0.0002	0.33
1350	806.3	353.4	0.89	0.89	0.0002	0.32
1365	806.3	353.4	0.89	0.90	0.0002	0.32
1380	806.3	353.4	0.89	0.90	0.0002	0.31
1395	809.4	356.5	0.90	0.90	0.0002	0.31
1410	806.3	353.4	0.89	0.91	0.0002	0.30
1425	809.4	356.5	0.90	0.91	0.0002	0.29
1440	812.5	359.5	0.91	0.91	0.0002	0.29
1455	812.5	359.5	0.91	0.92	0.0002	0.28
1470	815.5	362.6	0.91	0.92	0.0002	0.28
1485	815.5	362.6	0.91	0.92	0.0002	0.27
1500	818.6	365.7	0.92	0.93	0.0002	0.26
1515	818.6	365.7	0.92	0.93	0.0002	0.26
1530	818.6	365.7	0.92	0.93	0.0002	0.25
1545	818.6	365.7	0.92	0.93	0.0002	0.25
1560	821.7	368.7	0.93	0.94	0.0002	0.24
1575	821.7	368.7	0.93	0.94	0.0001	0.23
1590	821.7	368.7	0.93	0.94	0.0001	0.23
1605	821.7	368.7	0.93	0.94	0.0001	0.22
1620	824.8	371.8	0.94	0.94	0.0001	0.22
1635	824.8	371.8	0.94	0.95	0.0001	0.21
1650	827.8	374.9	0.95	0.95	0.0001	0.21
1665	827.8	374.9	0.95	0.95	0.0001	0.20
1680	827.8	374.9	0.95	0.95	0.0001	0.19
1695	827.8	374.9	0.95	0.95	0.0001	0.19
1710	830.9	378.0	0.95	0.95	0.0001	0.18
1725	830.9	378.0	0.95	0.96	0.0001	0.18
1740	830.9	378.0	0.95	0.96	0.0001	0.17
1755	830.9	378.0	0.95	0.96	0.0001	0.17
1770	830.9	378.0	0.95	0.96	0.0001	0.16
1785	830.9	378.0	0.95	0.96	0.0001	0.16
1800	834.0	381.0	0.96	0.96	0.0001	0.16
1815	834.0	381.0	0.96	0.96	0.0001	0.15
1830	834.0	381.0	0.96	0.97	0.0001	0.15
1845	834.0	381.0	0.96	0.97	0.0001	0.14
1860	834.0	381.0	0.96	0.97	0.0001	0.14
1875	837.1	384.1	0.97	0.97	0.0001	0.13

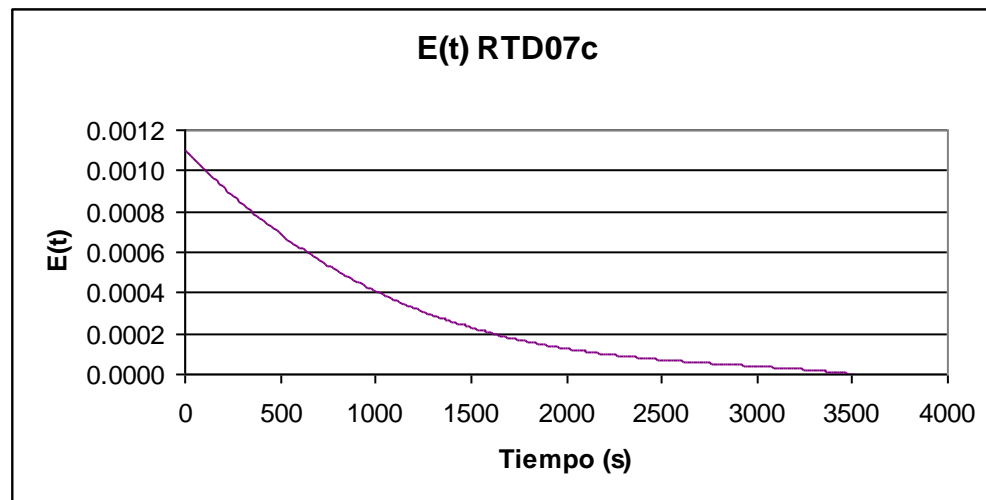
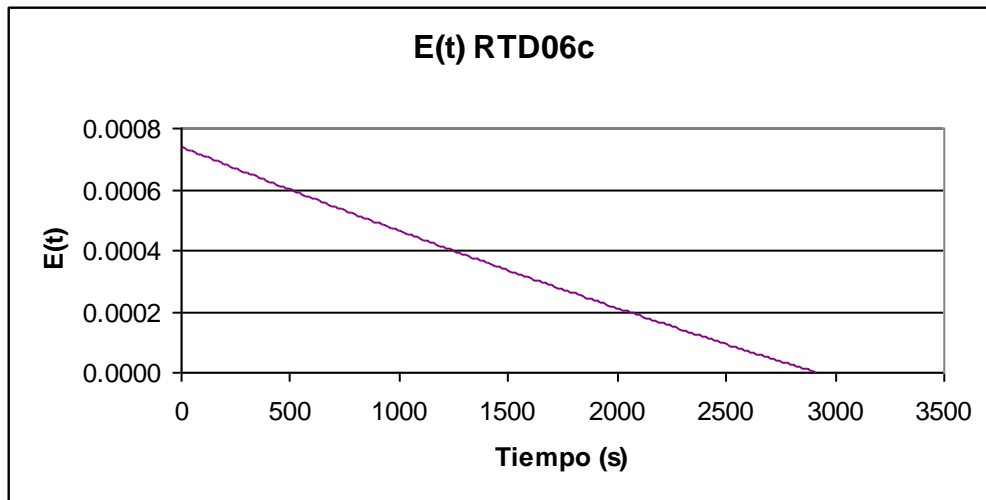
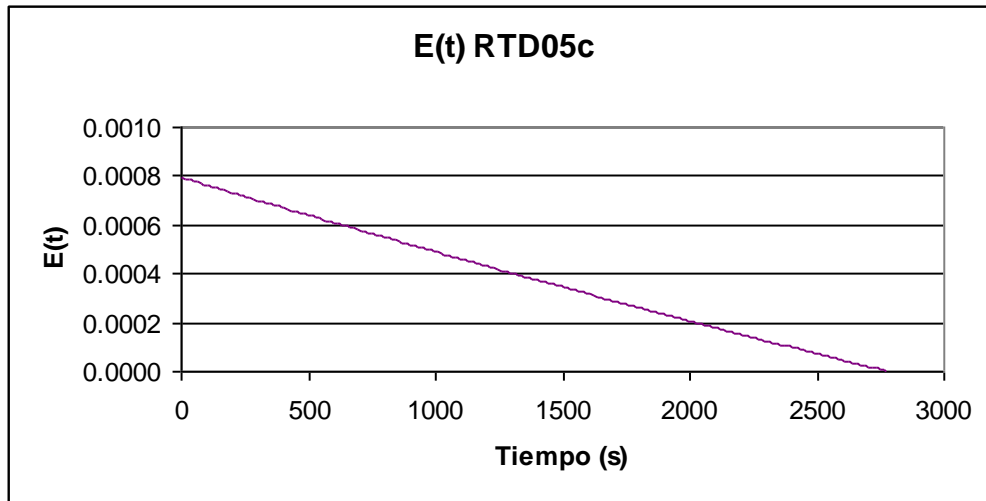
1890	837.1	384.1	0.97	0.97	0.0001	0.13
1905	837.1	384.1	0.97	0.97	0.0001	0.13
1920	837.1	384.1	0.97	0.97	0.0001	0.12
1935	837.1	384.1	0.97	0.97	0.0001	0.12
1950	840.1	387.2	0.98	0.97	0.0001	0.12
1965	840.1	387.2	0.98	0.98	0.0001	0.12
1980	840.1	387.2	0.98	0.98	0.0001	0.11
1995	840.1	387.2	0.98	0.98	0.0001	0.11
2010	840.1	387.2	0.98	0.98	0.0001	0.11
2025	840.1	387.2	0.98	0.98	0.0001	0.11
2040	843.2	390.3	0.98	0.98	0.0001	0.11
2055	843.2	390.3	0.98	0.98	0.0001	0.10
2070	843.2	390.3	0.98	0.98	0.0000	0.10
2085	843.2	390.3	0.98	0.98	0.0000	0.10
2100	843.2	390.3	0.98	0.98	0.0000	0.10
2115	843.2	390.3	0.98	0.98	0.0000	0.10
2130	846.3	393.3	0.99	0.98	0.0000	0.10

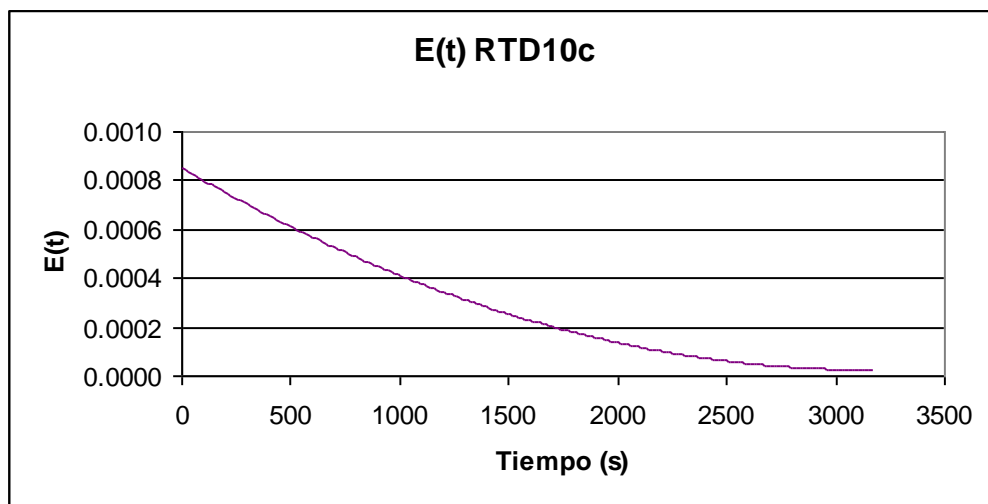
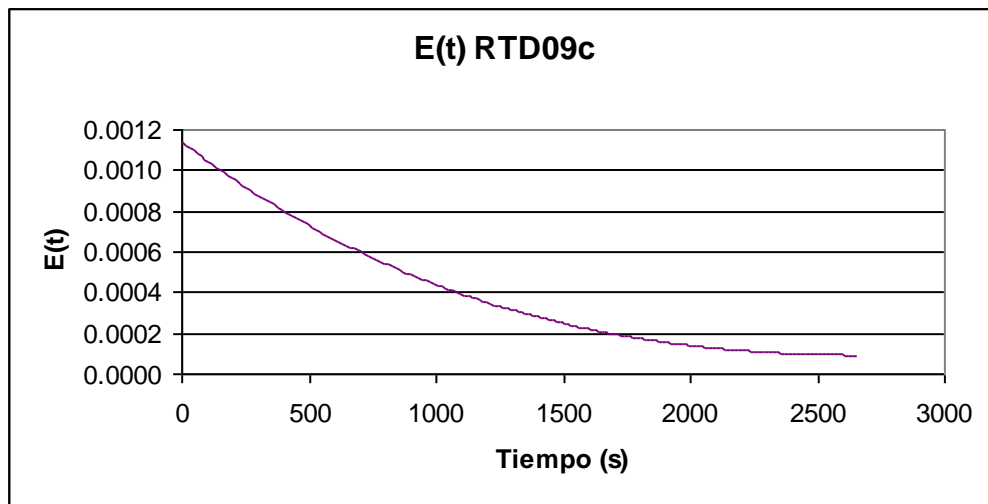
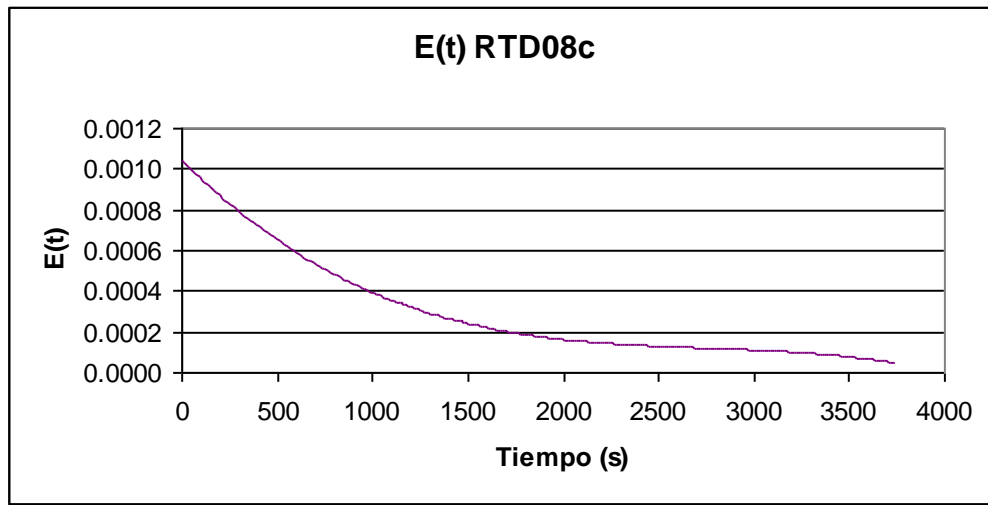


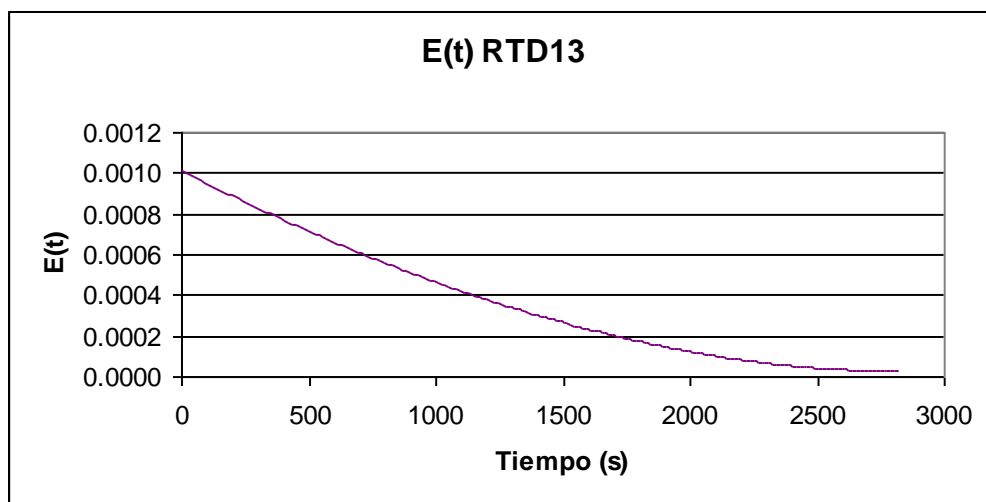
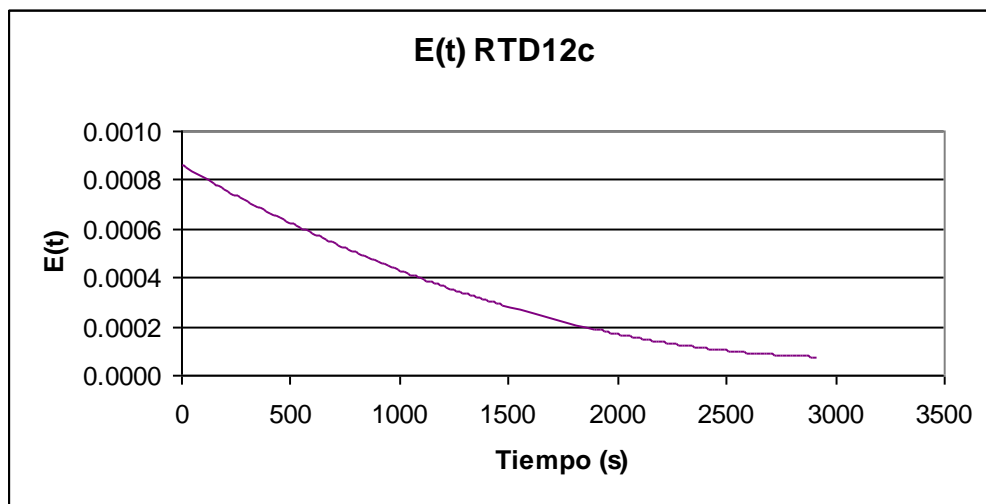
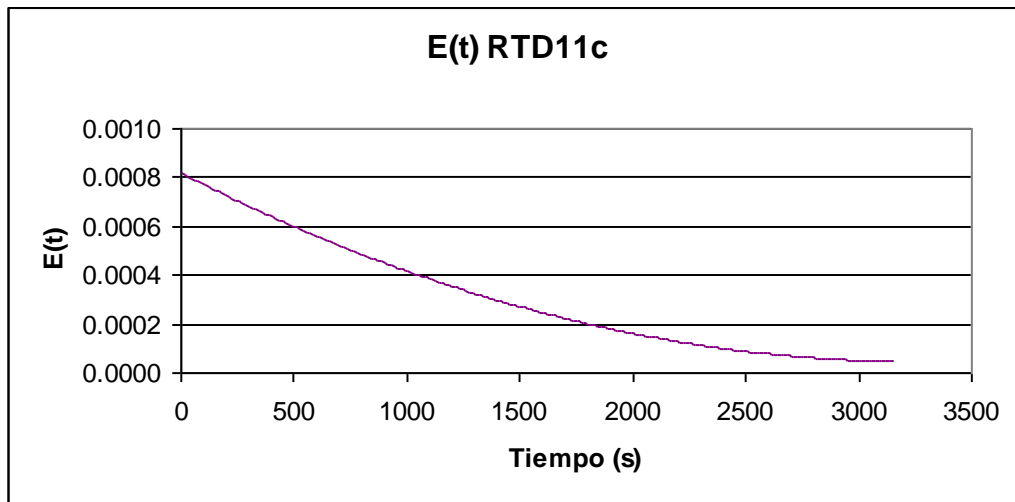


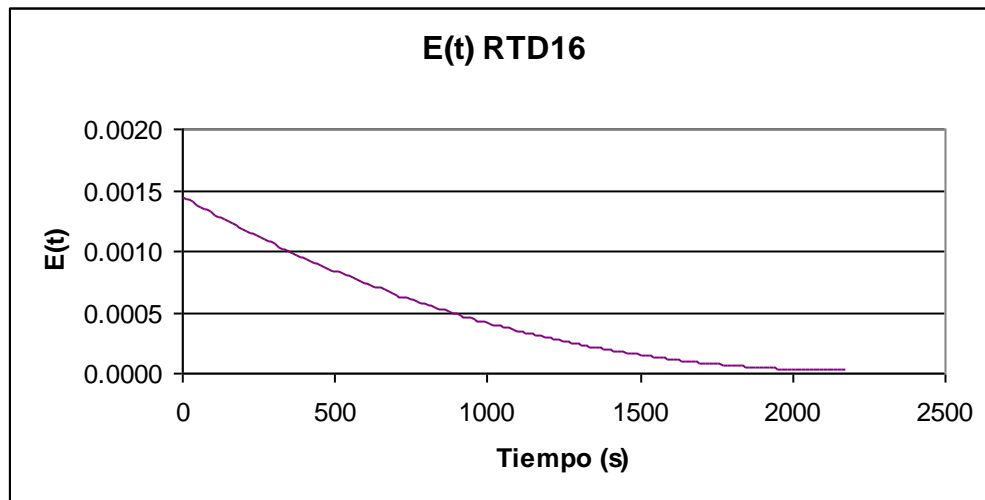
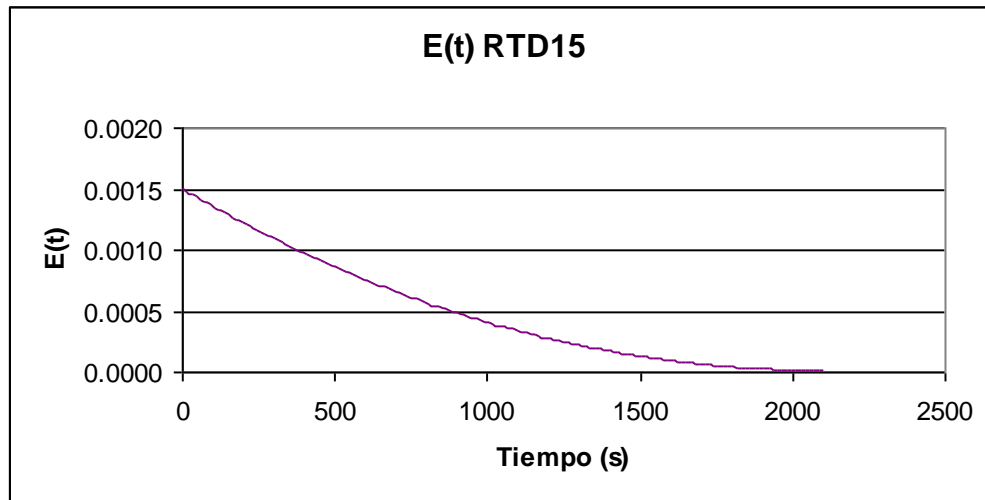
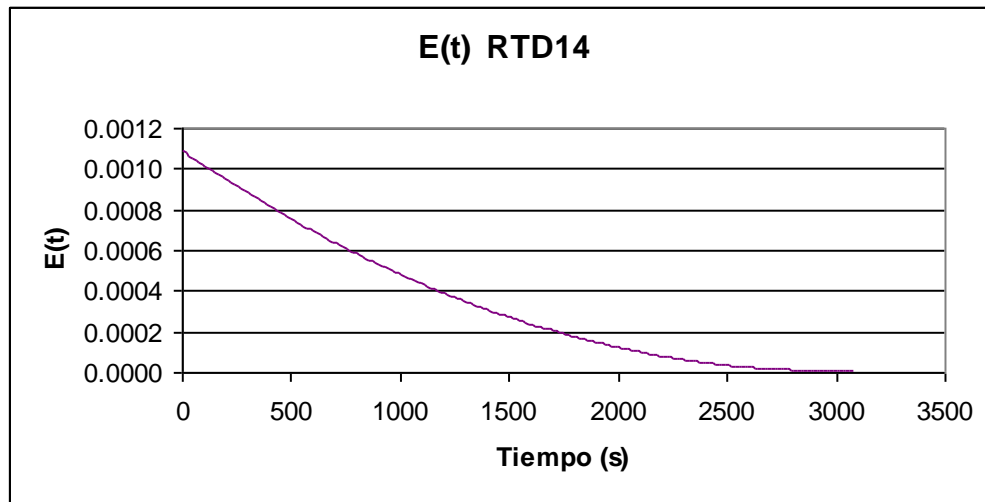
A continuación se presentan las gráficas $E(t)$ de todas las corridas realizadas.



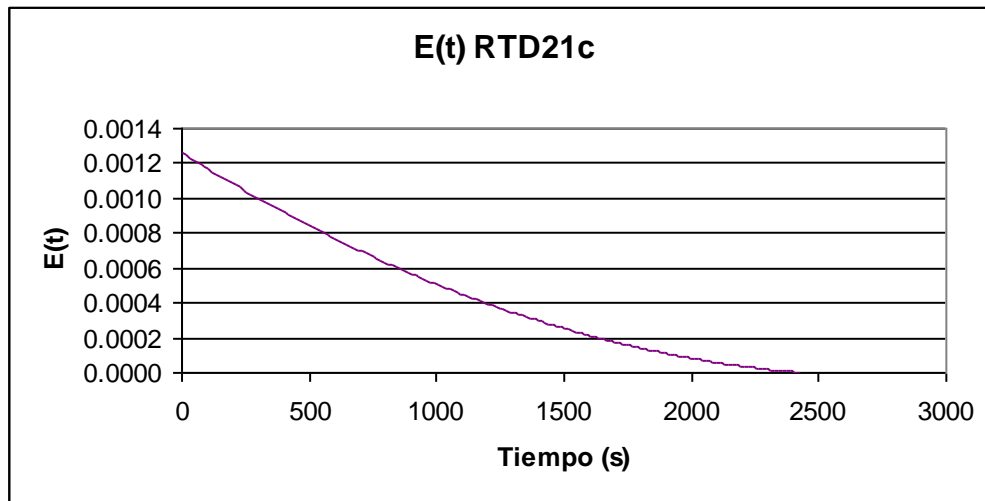
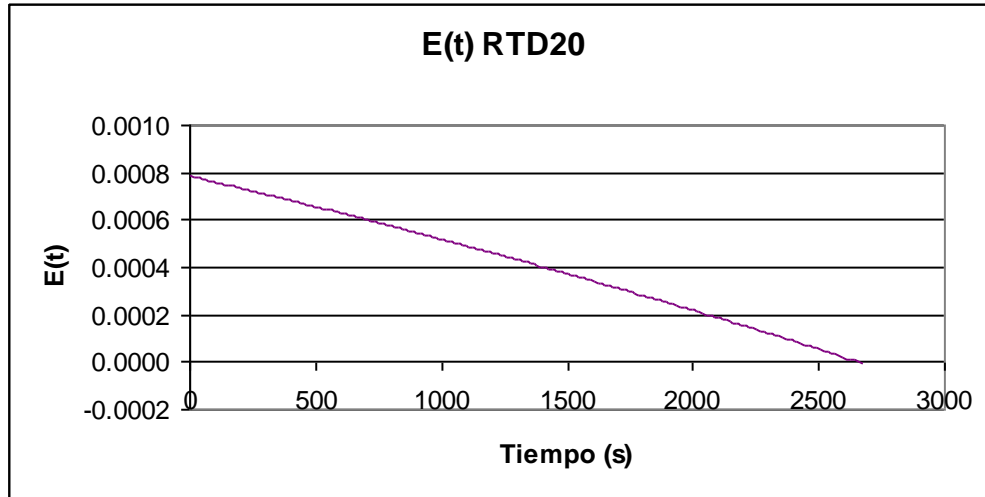








Las dos gráficas finales RTD20 y RTD21c corresponden, respectivamente, a las corridas adicionales que se realizaron con el vertedor rectangular múltiple y con el vertedor con tres orificios.



ANEXO E

ANÁLISIS DE VARIANZA

E.1 ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA EVALUACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA HIDRODINÁMICA															Tiempo medio de residencia			
Run	FACTORES P. B. DE LA MATRIZ COMPLETA														Nominal	Experim ntal	<i>e</i> * 100	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	minutos		
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	12.63	10.82	85.67
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	12.63	12.34	97.70
3	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	17.07	12.96	75.92
4	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	17.07	13.88	81.31
5	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	21.95	16.13	73.49
6	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	21.95	16.28	74.17
7	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	18.18	14.55	80.03
8	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	18.18	19.71	108.42
9	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	17.33	13.75	79.34
10	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	17.33	14.11	81.42
11	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	23.02	16.60	72.11
12	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	23.02	16.74	72.72
13	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	16.00	14.21	88.81
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	16.00	12.89	80.56
15	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	13.47	9.70	72.01
16	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	13.47	10.17	75.50

Comt.	-54.2	-15.8	6.8	-61.0	-72.9	52.5	-23.1	-31.3	-10.8	21.1	47.6	-4.2	-19.1	48.6	44.4			
-------	-------	-------	-----	-------	-------	------	-------	-------	-------	------	------	------	-------	------	------	--	--	--

TABLA DE ANOVA			para n=1			
Término de ajuste:			16			
	ONE WAY				F_{crt,15,2,.05}=	19.4
SOURCE	SS		DF	MS	F	
	WITHIN	86	2	43		
	BETWE EN	1504.5	15	100.3	2.3	
	TOTAL	1591	17			

	Error experimental	en %	
Replicacion run 14	T prom.	Epsilon	
Replic #1	11.95	75	
Replic #2	12.72	80	
Replic #3	14.01	88	
		81	promedio
	MSW =	43.0	Varianza
	Grados Libertad de MSW	2	

		DESCOMPOSICION DE SSB					Fert,1,2,,05=	18.5				
Cont. Labels			L					DATOS P/GRÁFICA			SS %	
	C estimado	SS (C)	Efecto asoc.	DF	MS (C)	F		Orden	SS (C) orden	contrast e	fisher F	cumul
A	-54.23	183.8	-6.78	1	183.8	4.3		1	332	E	7.7	22
B	-15.80	15.6	-1.98	1	15.6	0.4		2	233	D	5.4	38
C	6.79	2.9	0.85	1	2.9	0.1		3	184	A	4.3	50
D	-61.00	232.6	-7.63	1	232.6	5.4		4	172	F	4.0	61
E	-72.86	331.8	-9.11	1	331.8	7.7		5	147	N	3.4	71
F	52.45	171.9	6.56	1	171.9	4.0		6	141	K	3.3	80
G	-23.14	33.5	-2.89	1	33.5	0.8		7	123	O	2.9	89
H	-31.32	61.3	-3.92	1	61.3	1.4		8	61	H	1.4	93
I	-10.78	7.3	-1.35	1	7.3	0.2		9	33	G	0.8	95
J	21.14	27.9	2.64	1	27.9	0.6		10	28	J	0.6	97
K	47.55	141.3	5.94	1	141.3	3.3		11	23	M	0.5	98
L	-4.20	1.1	-0.52	1	1.1	0.0		12	16	B	0.4	99
M	-19.09	22.8	-2.39	1	22.8	0.5		13	7	I	0.2	100
N	48.57	147.4	6.07	1	147.4	3.4		14	3	C	0.1	100
O	44.42	123.3	5.55	1	123.3	2.9		15	1	L	0.0	100

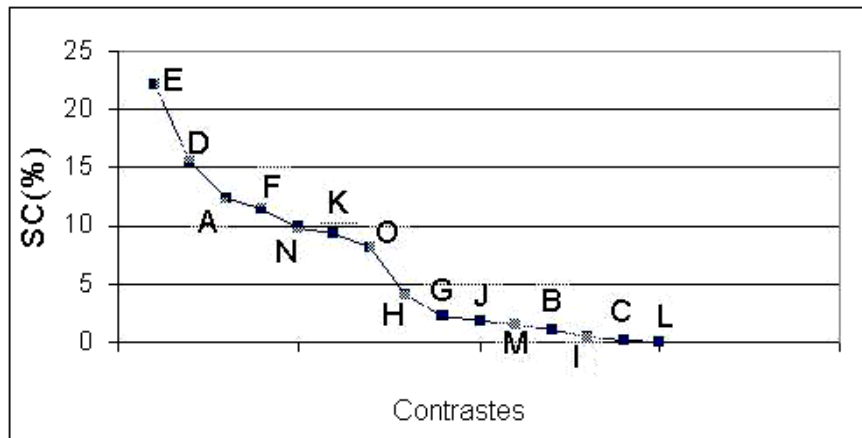


Fig. E.1. Resultados del análisis de varianza del plan estadístico para la evaluación hidrodinámica.

E.2 ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA EFICIENCIA																
	FACTORES P. B. DE LA MATRIZ BASE															Y
Run	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	E
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.77
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.82
3	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0.76
4	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0.77
5	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	0.74
6	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0.79
7	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0.71
8	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0.75
9	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	0.69
10	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0.68
11	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0.69
12	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	0.71
13	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	0.75
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0.77
15	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0.76
16	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0.75
Cont	-31.7	-37.4	12.6	4.4	-5.3	-13.3	-11	7.3	4.4	9.3	-2.2	-3.9	-3.8	11.7	18.7	

DESCOMPOSICION DE SSB					
Cont.	Labels		L		
	C estimat ed	SS (C)	Efecto asoc.	DF	MS (C)
A	-31.70	62.81	-4.0	1	62.8
B	-37.35	87.19	-4.7	1	87.2
C	12.64	9.98	1.6	1	10.0
D	4.45	1.24	0.6	1	1.2
E	-5.34	1.78	-0.7	1	1.8
F	-13.34	11.13	-1.7	1	11.1
G	-10.80	7.29	-1.4	1	7.3
H	7.32	3.35	0.9	1	3.3
I	4.40	1.21	0.6	1	1.2
J	9.30	5.40	1.2	1	5.4
K	-2.19	0.30	-0.3	1	0.3
L	-3.88	0.94	-0.5	1	0.9
M	-3.79	0.90	-0.5	1	0.9
N	11.74	8.62	1.5	1	8.6
O	18.71	21.88	2.3	1	21.9

		% indiv
87.19	B	38.92
62.81	A	28.04
21.88	O	9.77
11.13	F	4.97
9.98	C	4.46
8.62	N	3.85
7.29	G	3.26
5.40	J	2.41
3.35	H	1.49
1.78	E	0.80
1.24	D	0.55
1.21	I	0.54
0.94	L	0.42
0.90	M	0.40
0.30	K	0.13
224.0		

	SSB total	224

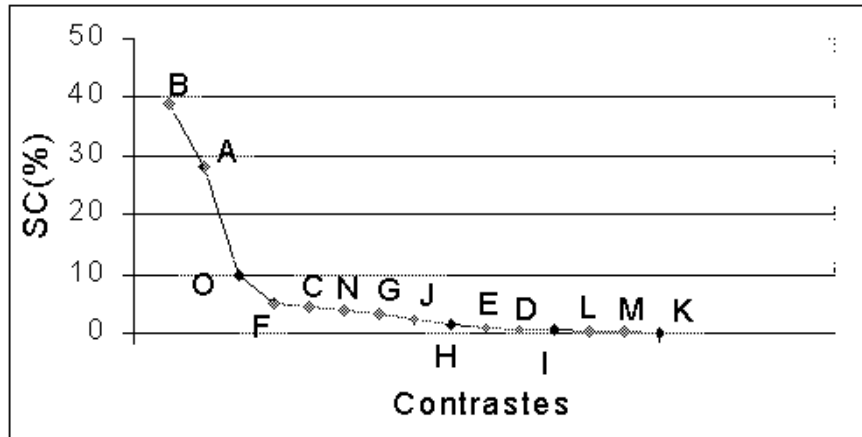


Fig. E.2. Resultados del análisis de varianza del plan estadístico para la evaluación de la eficiencia del separador piloto.

ANEXO F NORMAS

F.1 NORMA NOM-001-ECOL-1996

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																					
PARÁMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO		HUMEDALES NATURALES (B)		
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)				
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	
Materia Flotante (3)	au	au	au	au	au	au	au	au	au	au	au	Au	au	au	au	au	au	au	au	au	
	sen	sen	sen	sen	sen	sen	sen	sen	sen	sen	sen	Sen	sen	sen	sen	sen	sen	sen	sen	sen	
	te	te	te	te	te	te	te	te	te	te	te	Te	te	te	te	te	te	te	te	te	
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2	
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150	
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

(1) Instantáneo

(2) Muestra Simple Promedio Ponderado

(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006.

P.D.= Promedio Diario; P.M. = Promedio Mensual:

N.A. = No es aplicable.

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

F.2. NORMA NOM-002-ECOL-1996

Tabla 1

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES			
PARÁMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	Promedio Mensual	Promedio Diario	Instantáneo
Grasas y Aceites	50	75	100
Sólidos Sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

4.3 El rango permisible de pH (potencial hidrógeno) en las descargas de aguas residuales es de 10 (diez) y 5.5 (cinco punto cinco) unidades, determinado para cada una de las muestras simples. Las unidades de pH no deberán estar fuera del intervalo permisible, en ninguna de las muestras simples.

4.6. Los límites máximos permisibles para los parámetros demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales, que debe cumplir el responsable de la descarga a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, son los establecidos en la Tabla 2 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 referida en el punto 2 de esta norma, o a las condiciones particulares de descarga que corresponde cumplir a la descarga municipal.