



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio experimental de la velocidad
local de tapones que se presentan en
el régimen intermitente del flujo
bifásico horizontal líquido-gas**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Yael Omar Morales Martínez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Jonathan Hernández García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD LOCAL DE TAPONES QUE SE PRESENTAN EN EL REGIMEN INTERMITENTE DEL FLUJO BIFASICO HORIZONTAL LIQUIDO-GAS que presenté para obtener el título de INGENIERO MECÁNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

Yael Omar Morales Martínez
Número de cuenta: 317048971

Presidente

Dr. José Luis Fernández Zayas

Vocal

Dr. Jonathan Hernández García

Secretario

Dr. Alejandro Rodríguez Valdés

Primer suplente

Ing. Eduardo Dorantes Sevilla

Segundo suplente

Dr. Arturo Palacio Pérez

Director

Dr. Jonathan Hernández García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., México

Mayo, 2025

Con todo el amor y la fuerza del mundo:

A mi madre y padre

A mis hermanos, Paola y Edgard

A Darcy y Bmo

A toda mi familia y amigos

A mi país

A la memoria de mis abuelas:

Margarita Solache Martínez y Eulalia Pablos Tapia

A la memoria de mis tíos:

Carmen Morales Pablos y Antonio Morales Pablos

Que en paz descansen

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, la máxima casa de estudios, mi alma mater, y a la Facultad de Ingeniería, por colocar en el camino instrumentos estratégicos para consolidar la trayectoria de mi actividad profesional

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, distinguido centro de investigación a nivel internacional, por dar soporte a este trabajo

A los señores profesores, insignes referentes para la Ingeniería en México:

Dr. Jonathan Hernández García, por la sobresaliente dirección

Dr. Arturo Palacio Pérez, por la notable tutoría

Dr. Alejandro Rodríguez Valdés, por la honorable invitación para integrarme a la Coordinación de Ingeniería de Procesos Industriales y Ambientales

Dr. José Luis Fernández Zayas, por las magníficas cátedras

Ing. Eduardo Dorantes Sevilla, por los valiosos consejos, experiencias y acercamiento al sector petrolero, hidrocarburos y gas natural

Muchas gracias

NOMENCLATURA

Abreviaturas	
MBPD	Miles de barriles por día
BPD	Barriles por día

Acrónimos	
SENER	Secretaría de Energía
SIE SENER	Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía
PEMEX	Petróleos Mexicanos

Variables		Dimensionamiento SI ¹
A_{st}	Área de sección transversal de la tubería	L^2
f_t	Frecuencia de tapón	T^{-1}
$\dot{m}$	Flujo másico	MT^{-1}
$\dot{m}_g$	Flujo másico de gas	MT^{-1}
$\dot{m}_l$	Flujo másico de líquido	MT^{-1}
$\dot{Q}_l$	Gasto volumétrico de líquido	L^3T^{-1}
$\dot{Q}_g$	Gasto volumétrico de gas	L^3T^{-1}
$\dot{m}_l$	Gasto másico de líquido	MT^{-1}
$\dot{m}_g$	Gasto másico de gas	MT^{-1}
l_t	Longitud de la tubería de visualización	L
l_p	Longitud entre transductores de presión	L
P	Presión de almacenamiento de aire comprimida	$ML^{-1}T^{-2}$
P_t	Presión del transductor	$ML^{-1}T^{-2}$
P_{op}	Presión de operación del compresor	$ML^{-1}T^{-2}$
ΔP	Gradiente de presión	$ML^{-1}T^{-2}$
P_{exp}	Presión en el circuito experimental	$ML^{-1}T^{-2}$
T_{exp}	Temperatura en el circuito experimental	θ
D_{int}	Diámetro interno de la tubería	L
u_{lt}	Velocidad local del tapón	LT^{-1}
u_{sl}	Velocidad superficial de la fase líquida	LT^{-1}
u_{sg}	Velocidad superficial de la fase gaseosa	LT^{-1}
u_{sm}	Velocidad superficial de la mezcla bifásica	LT^{-1}
ρ_l, ρ_g	Densidad del líquido y gas	ML^{-3}
R	Constante del aire	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$
μ	Viscosidad dinámica	$ML^{-1}T^{-1}$
i	Corriente eléctrica	I
V	Diferencial de voltaje	$ML^2I^{-1}T^{-3}$

¹ Sistema Internacional de Unidades.

CONTENIDO

RESUMEN	VIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ESTRUCTURA DE LA TESIS	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE ESTUDIO	1
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos particulares	3
1.4. ALCANCES	4
1.5. HIPÓTESIS.....	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. POLÍTICA ENERGÉTICA EN MÉXICO	5
2.2. CADENA DE VALOR DEL CRUDO	8
2.2.1. Producción y reservas de crudo en México	9
2.3. ASEGURAMIENTO DE FLUJO	10
2.4. FLUJO MULTIFÁSICO: FLUJO BIFÁSICO LÍQUIDO-GAS	10
2.4.1. Patrones de flujo bifásico en tuberías horizontales	10
2.4.2. Correlaciones predictivas para la frecuencia de tapones en flujo bifásico horizontal líquido-gas de baja viscosidad	12
CAPÍTULO 3. LABORATORIO DE FLUJO MULTIFÁSICO IINGEN, UNAM.....	14
3.1. SUBSISTEMA HIDRÁULICO	14
3.2. SUBSISTEMA NEUMÁTICO	15
3.3. SUBSISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES	16
3.4. SUBSISTEMA DE PRUEBAS	17
3.5. SUBSISTEMA DE VISUALIZACIÓN DE PRUEBAS	18
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN	20
4.1. MATRIZ EXPERIMENTAL	20
4.2. VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL FLUJO BIFÁSICO LÍQUIDO-GAS.....	20
4.3. VELOCIDAD LOCAL DE TAPONES EN EL FLUJO BIFÁSICO LÍQUIDO-GAS: INSTALACIÓN DE TRANSDUCTORES DE PRESIÓN	25
4.4. VELOCIDAD LOCAL DE TAPONES EN EL FLUJO BIFÁSICO LÍQUIDO-GAS: CAMPAÑA EXPERIMENTAL Y ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE PRESIÓN	30

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES	32
5.1. TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES DE PRESIÓN.....	32
5.2. SUAVIZADO DE LAS SEÑALES DE PRESIÓN CON FILTRO DE VENTANA MEDIA MÓVIL	36
5.3. CRITERIO DE LA PRIMERA DERIVADA DE SEÑALES DE PRESIÓN	38
5.4. FRECUENCIA ASOCIADA A LA FORMACIÓN DE LOS TAPONES.....	43
5.5. DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA DE LAS SEÑALES DE PRESIÓN.....	46
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	50
6.1. FRECUENCIA DE LOS TAPONES	50
6.2. VELOCIDAD LOCAL PROMEDIO DE LOS TAPONES.....	53
6.3. DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA.....	60
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	66
7.1. TRABAJO FUTURO	67
REFERENCIAS	68
LISTA DE TABLAS	70
LISTA DE FIGURAS	71
LISTA DE MODELOS MATEMÁTICOS.....	72

RESUMEN

Un buen porcentaje de la soberanía energética de México y el mundo se alcanza a razón de la garantía integral del suministro de combustibles fósiles como gas natural, diésel y gasolina. Con ello se fortalecen sectores como el de generación de energía eléctrica, la industria metalúrgica, química, los usos residenciales y de transporte. El trasiego de estos energéticos se hace complejo por tratarse de flujo multifásico, donde se tiene el flujo simultáneo de varias fases. Puntualmente, en el patrón de flujo intermitente del flujo bifásico horizontal se tiene la manifestación de un fenómeno de taponamiento de sección transversal en las tuberías; propiciando fluctuaciones mecánicas en los sistemas de producción. Su comportamiento es función, entre otros parámetros, de las propiedades de los fluidos que integran la mezcla de dos fases y de la configuración del sistema de transporte.

Para describir a cabalidad el comportamiento de los tapones, este estudio experimental reúne una matriz de veinticinco experimentos con mezcla de agua en condiciones de presión y temperatura ambientales y aire comprimido hasta 15 [psi] (103.4 [kPa]) para emular iterativamente el transporte de este flujo. La campaña de experimentación se ejecutó en el circuito cerrado del Laboratorio de Flujo Multifásico del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual se instrumentó con transductores de presión para adquirir señales de presión dentro de una tubería con diámetro nominal de tres pulgadas.

Se emplearon gastos máscicos ascendentes inyectados de líquido y gas de: $1 \leq \dot{m}_l \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \leq 5$ y $0.005 \leq \dot{m}_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \leq 0.025$, respectivamente, conduciendo a la obtención de velocidades superficiales de flujo de líquido y gas que comprenden los siguientes intervalos referidos a la mezcla bifásica de: $0.24 \leq u_{sl} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \leq 1.19$ y $1.36 \leq u_{sg} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \leq 5.92$. Así, con base en las señales de presión, temperatura y flujos máscicos registrados para cada uno de los veinticinco experimentos que comprenden la campaña experimental de este trabajo, fue realizado un análisis para cuantificar las características de la formación de los tapones, así como la frecuencia asociada a estos, lo cual constituye un método no invasivo de estimación para las velocidades locales promedio de los tapones, que se describen en función de las velocidades superficiales de líquido, gas y mezcla.

Palabras clave:

Flujo bifásico horizontal

Patrón de flujo intermitente

Frecuencia de tapones

Velocidad local promedio de tapones

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este documento reporta el estudio experimental sobre flujo bifásico horizontal líquido-gas (agua y aire comprimido), que se realizó en la Coordinación de Ingeniería de Procesos Industriales y Ambientales del Instituto de Ingeniería, para identificar la relación entre la velocidad local de los tapones que se generan en el patrón de flujo intermitente y las velocidades características de este, es decir, las velocidades superficiales y de la mezcla. Razón por la cual se expone un método de estimación cuantitativo de las frecuencias de formación de los tapones y sus velocidades locales promedio, el cual comprende un arreglo experimental de transductores de presión no invasivo para el sistema de tuberías del circuito de pruebas del Laboratorio de Flujo Multifásico.

La justificación de este trabajo se sostiene con el entendimiento de la formación de tapones como un obstáculo técnico y económico para las industrias que manipulan el aseguramiento de este tipo de flujos. Sustancialmente la petrolera con el trasiego de gas natural, crudo y petrolíferos derivados de este. De ahí que se exponga la estructura orgánica de la política energética de México en materia de hidrocarburos y las bases teóricas del flujo multifásico. Posteriormente se describen los elementos con los que se experimentó, que son: las variables físicas, las instalaciones del laboratorio, la instrumentación electrónica, la obtención de señales de presión, el tratamiento computacional y la validación de estas. Al final, como resultado de esta ruta de trabajo se declaran los análisis físicos y estadísticos de los veinticinco eventos de la campaña experimental que conjunta esta investigación.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

El Estado Mexicano ratifica sobremanera que el suministro accesible de combustibles fósiles debe ser uno de los ejes rectores de la soberanía energética. El trasiego y uso de gas natural, crudo y petrolíferos intensifica notablemente las actividades de múltiples industrias en la modernidad tecnológica. Sirva de ejemplo el Balance Nacional de Energía de 2023 que publicó la Secretaría de Energía en consideración a los usos finales de los petrolíferos. Ver tabla 1.1.

Fundamentalmente destaca el consumo de gasolina y diésel por su alta eficiencia energética para actividades comerciales y no comerciales de transporte, seguido por la generación de energía eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad y participación privada, labores industriales, y usos propios del sector petrolero. Además, de acuerdo con la Política Pública de Almacenamiento Mínimo de Petrolíferos se ajustan las reservas con el propósito de garantizar autonomía energética frente a las emergencias internacionales de naturaleza geopolítica. Ver tabla 1.2.

En concreto, México totaliza un esquema mixto de aprovisionamiento por lo que se refiere a hidrocarburos. De una producción promedio de crudo oscilante entre 1600 a 1800 [MBD], aproximadamente del 55.50 % al 56.25 % se destina exclusivamente a ductos de exportación para Estados Unidos y Europa, siendo los crudos Maya, Istmo y Olmeca las principales mezclas de interés. En tanto que un porcentaje variante del 43.75 % al 44.5 % permanece en el Sistema Nacional de Refinación para su aprovechamiento. Ver tabla 1.3.

Consumo total de
energía en 2022

1327.9 [MBD]

Distribución por sector	Sector transporte 83.3 %	Sector electricidad 7.6 %	Sector industrial 7.3 %	Sector petrolero 1.7 %
Distribución por petrolífero líquido	1 106.7 [MBD] Gasolina (662.8) Diésel (358.3) Turbosina (84.8) Combustóleo (0.9) Coque (0)	101.5 [MBD] Gasolina (0) Diésel (17.7) Combustóleo (68) Turbosina (0) Coque (15.8)	96.5 [MBD] Gasolina (0) Diésel (23.5) Combustóleo (7) Turbosina (0) Coque (66)	23.1 [MBD] Gasolina (0.5) Diésel (9) Combustóleo (13.6) Turbosina (0) Coque (0)
Distribución por uso	Auto (91.3 %) Aéreo (7 %) Ferroviario (0.9 %) Marítimo (0.8 %)	CFE Generación ² (56 %) Iniciativa Privada (44 %)	Celulosa Minería Química (Combustóleo) Cemento (Coque)	Cogeneración (56.8 %) Transporte y generación eléctrica (43.2 %)

Tabla 1.1. Demanda de petrolíferos por sector (SENER, 2023).

Petrolíferos seleccionados	Autonomía [días] (2020-2025)
Gasolina	5 en terminales nacionales
Diésel	5 en terminales nacionales
Turbosina	1.5 en aeropuertos y/o aeródromos más 1.5 adicional en terminales nacionales.

Tabla 1.2. Autonomía de petrolíferos seleccionados (DOF, 2019).

Todas estas observaciones refieren a la importancia de la distribución para los usos finales del crudo, y por ende, del flujo multifásico; este último entendido como el flujo simultáneo de más de una fase, por ejemplo: la combinación de concentraciones sólidas, líquidos de viscosidad variable y gases. Esto desde la etapa *upstream* con sistemas integrales de producción hasta la etapa final *downstream* de comercialización. Sin embargo, a esta operación técnica se le asocian numerosos inconvenientes durante las etapas productivas, tales como bloqueos, daños en tuberías y problemas asociados a la reología e inestabilidad de los fluidos, los cuales de no ser tratados decrementan el rendimiento

² La subsidiaria de CFE, CFE Generación, se consolida como una empresa energética internacional. Contribuye con el 56 % de la generación eléctrica nacional para el 99.5 % de la electrificación actual del país. Esto se reporta al 30 de junio de 2024 (SENER, 2023).

integral de las instalaciones y equipos industriales, como bombas, inyectoras, compresores, separadores, tanques de almacenamiento, válvulas y sellos mecánicos.

	Condensados [MBD]	Superligero >38 [°API] ³ [MBD] Olmea 14 % exportación	Ligero (27,38) [°API] [MBD] Istmo 20 % exportación Zapoteco 7 % exportación	Pesado ≤22 [°API] [MBD] Maya 59 % exportación ⁴	
2022	133	320	480	910	1 843
2023	125	410	380	940	1 855
2024	149	392	426	855	1 673

Tabla 1.3. Producción de crudo en México (2022-2024) (PEMEX, 2024).

Entonces, sobre la base del problema expuesto y su contextualización en un entorno de transporte de recursos energéticos, se madura una propuesta que analice la velocidad local promedio de tapones y la frecuencia de formación asociada a estos.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Identificar a través de un método experimental no invasivo que la velocidad local promedio de tapones que se manifiestan en el patrón de flujo intermitente por efecto de los sistemas de tuberías y los caudales inyectados en flujo bifásico horizontal líquido-gas, resulta ser distinta a cada una de las velocidades características del flujo (líquido, gas, mezcla).

1.3.2. Objetivos particulares

- Reconocer los principios del flujo bifásico líquido-gas, de manera que se ejecute la correcta interpretación de resultados experimentales con ayuda de bibliografía especializada de alto nivel.
- Instrumentar el subsistema de visualización del circuito experimental con transductores industriales de presión, en dirección a recopilar señales de presión de las columnas de la mezcla bifásica líquido-gas.
- Procesar digitalmente las señales de presión adquiridas, con la finalidad de cuantificar la velocidad local promedio de los tapones y la frecuencia de formación asociada a estos, empleando el lenguaje de programación Matrix Laboratory.
- Exponer los resultados obtenidos y la validación correspondiente para incrementar la exploración de este tema, registrando sistemáticamente la metodología de trabajo.

³ La Secretaría de Energía define la densidad API como la medida estándar conforme a las normas del *American Petroleum Institute*. Indica la densidad del crudo en comparación con la densidad del agua (SENER, 2023). La expresión correspondiente es:

$$\text{Densidad API [°API]} = \frac{141.5}{\rho_{\text{relativa}}} - 131.5 = \frac{141.5}{\left(\frac{\rho_{\text{crudo}}}{\rho_{\text{agua}}}\right)} - 131.5 \quad (1.1)$$

⁴ (PEMEX, 2024).

- Destacar la frecuencia de formación de tapones como un área de oportunidad técnica dentro del sector de hidrocarburos, a fin de promover la investigación y difusión de este fenómeno con la ayuda del estudio de los eslabones productivos en este campo.

1.4. ALCANCES

En sintonía con el nivel experimental y objetivo general de esta tesis, los límites para este estudio se trazan de acuerdo con las siguientes consideraciones:

- La fase líquida de experimentación comprende agua en condiciones de presión y temperatura ambientales, mientras que la fase gaseosa corresponde a aire que se comprime hasta 15 [psi] = 103.4[kPa] y se modela de acuerdo con la ecuación de estado de los gases ideales.
- La campaña experimental se integra por veinticinco experimentos, para los cuales se tiene una mezcla configurada de líquido y gas con un rango de gastos másicos correspondientes a $1 \leq \dot{m}_l \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \leq 5$ y $0.05 \leq \dot{m}_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \leq 0.025$, respectivamente.
- El proceso de adquisición de datos experimentales se da en intervalos de cinco minutos por experimento. Para la recolección de valores de presión se configura el módulo de adquisición a una frecuencia de 50 [Hz], con la cual se arrojan quince mil elementos. Por su parte, se tiene una frecuencia de 10 [Hz] para datos de gastos másicos con un total de tres mil elementos.
- Las velocidades superficiales de líquido y gas asociadas al flujo simultáneo de agua y aire que se reproducen en el circuito de pruebas del Laboratorio de Flujo Multifásico se encuentran en los rangos $0.24 \leq u_{sl} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \leq 1.19$ y $1.36 \leq u_{sg} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \leq 5.92$.

1.5. HIPÓTESIS

Dentro de los sistemas integrales de producción con presencia de flujo multifásico, particularmente flujo bifásico horizontal líquido-gas, se manifiesta el patrón de flujo intermitente, donde los tapones líquidos aereados que se forman tienden a obstruir el área de sección transversal de las tuberías. La causa de este fenómeno se asocia con la capacidad de acumulación de líquido y la geometría de las líneas de tubería; sus efectos derivan en reducciones a la producción y deterioro mecánico, de ahí entonces que sea oportuno identificar las características de este fenómeno para su posible control y mitigación. Para tal efecto, es posible determinar la velocidad local promedio de los tapones y la frecuencia de formación asociada a través de un método experimental no invasivo basado en la obtención de señales de presión.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. POLÍTICA ENERGÉTICA EN MÉXICO

En suelo mexicano, el sector energético se ordena de acuerdo con los lineamientos de la Secretaría de Energía, que toma como fundamentos constitucionales a los artículos 25, 26, 27, 28, 73, 89 y 90. En ese sentido, sus atribuciones son la conducción, coordinación, supervisión, desarrollo y diversificación de este sector estratégico. Para ello se soporta en los órganos reguladores coordinados⁵, los cuales resultan ser constitucionalmente autónomos, en los organismos descentralizados⁶, pertenecientes al sector paraestatal de la administración pública federal, en los órganos desconcentrados⁷, integrados al sector central de las secretarías, y en las empresas públicas del Estado⁸. En suma, todos ellos fortalecen la autosuficiencia energética del país. Ver figura 2.1.

De acuerdo con lo anterior, en los últimos años la ordenanza política ha colocado a las empresas públicas del Estado como catalizadores para el desarrollo económico del país. Con exactitud, en este texto se hace referencia al sector hidrocarburos, para el cual se fracciona el territorio nacional en ocho⁹ regiones estratégicas, donde se tienen las siguientes estadísticas de petrolíferos. Ver tabla 2.1.

Febrero, 2023 [MBPD]	Gasolina	Diésel	Turbosina	Combustóleo
Producción, importación	324, +504	105, +193	29, +71	308, -188
Demanda	769	347	110	30
Inventarios [MB]	6215	2738	908	1045
Febrero, 2024 [MBPD]	Gasolina	Diésel	Turbosina	Combustóleo
Producción, importación	365, +231	150, +84	29, +71	300, -232
Demanda	749	362	100	19
Inventarios [MB]	7488	3595	1015	1161

Tabla 2.1. Estadísticas de petrolíferos 2023 y 2024 (SENER, 2023).

⁵ CRE: Comisión Reguladora de Energía, CNH: Comisión Nacional de Hidrocarburos. En 2025 desaparecen estos órganos reguladores autónomos con la creación de la Comisión Nacional de Energía (CNE), la cual absorbe estas funciones como órgano desconcentrado de la Secretaría de Energía.

⁶ IMP: Instituto Mexicano del Petróleo, INEEL: Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, ININ: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, CENAGAS: Centro Nacional de Control del Gas Natural, SISTRANGAS: Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural, CENACE: Centro Nacional de Control de Energía, SEN: Sistema Eléctrico Nacional, LITIOMEX: Litio para México.

⁷ ASEA: Agencia de Seguridad, Energía y Medio Ambiente, CONUEE: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, CNSNS: Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias.

⁸ PEMEX: Petróleos Mexicanos, CFE: Comisión Federal de Electricidad.

⁹ Centro, Golfo, Noreste, Noroeste, Norte, Occidente, Sur, Sureste.

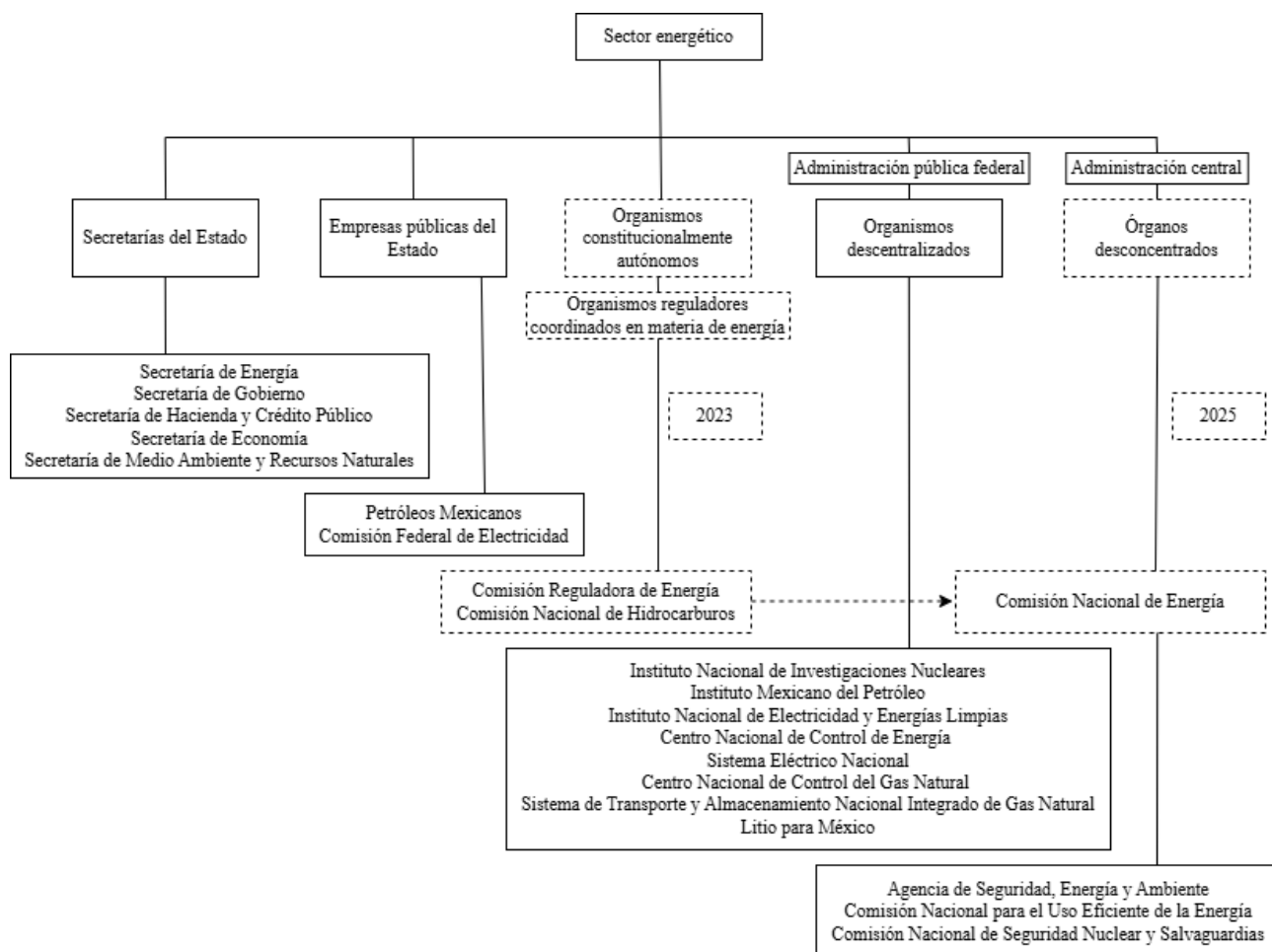


Figura 2.1. Estructura orgánica del Sector Energético (SENER, 2023).

De las mencionadas estadísticas es importante subrayar los números negativos referentes a la exportación de combustóleo, el cual predomina en México dentro de los ciclos de refinación de petróleo crudo, con alto contenido de azufre y peso molecular, el cual es considerado el desecho de la refinación, sumamente contaminante e ineficiente para usos energéticos de potencia. Por su parte, la importación de la molécula de gasolina, diésel y turbosina impera ante la demanda de estos petrolíferos seleccionados.

Esta importación viene a socorrer la producción de las ocho refinerías que integran el Sistema Nacional de Refinación (SNR) pertenecientes a PEMEX TRI¹⁰ con las siguientes capacidades para procesar crudo:

¹⁰ PEMEX TRI: Petróleos Mexicanos Transformación Industrial.

Refinería	Ubicación	Región	Capacidad nominal (2024) - Capacidad real
Olmecca Dos Bocas (2023)	Paraíso, Tabasco, México	Sureste	340 [MBPD] - No aplica.
Deer Park (2022)	Deer Par, Texas, Estados Unidos	Norte	340 [MBPD] - 281 [MBPD]
Ing. Héctor R. Lara Sosa (1979)	Cadereyta, Nuevo León, México	Noreste	275 MBPD] - 118.8 [MBPD]
Francisco I. Madero (1976)	Madero, Tamaulipas, México	Noreste	190 [MBPD] - 98 [MBPD]
Miguel Hidalgo (1976)	Tula, Hidalgo, México	Centro	315 [MBPD] - 179.7 [MBPD]
Ing. Antonio M. Amor (1950)	Salamanca, Guanajuato, México	Occidente	220 [MBPD] - 129.6 [MBPD]
Ing. Antonio Dovalí Jaime (1979)	Salina Cruz, Oaxaca, México	Sur	330 [MBPD] - 177.9 [MBPD]
Gral. Lázaro Cárdenas del Río (1956)	Minatitlán, Veracruz, México	Sureste	285 [MBPD] - 111.8 [MBPD]
			Capacidad nominal total (2024) 2 295 [MBPD] - Capacidad real total 1 096.8 [MBPD]

Tabla 2.2. Sistema Nacional de Refinación (SENER, 2023).

Con ello, se tuvo para 2022 una capacidad de refinación equivalente a 1 615 [MBD], que para 2024 se complementa con los 680 [MBPD] de capacidad nominal en las refinerías Olmecca y Deer Park, respectivamente. Sin embargo, en 2022 únicamente se procesaron 1 096.8 [MBD] de petróleo crudo. Con mayores producciones en Cadereyta, Tula y Salina Cruz, pero con una predominancia de petróleo crudo pesado por encima del ligero y superligero.

	Producción de petrolíferos (gasolinas, diésel, combustóleo, querosenos, otros)
2022	1 001 [MBD]
2023	844 [MBD]
2024	818 [MBD]

Tabla 2.3. Producción de petrolíferos (PEMEX, 2024).

2.2. CADENA DE VALOR DEL CRUDO

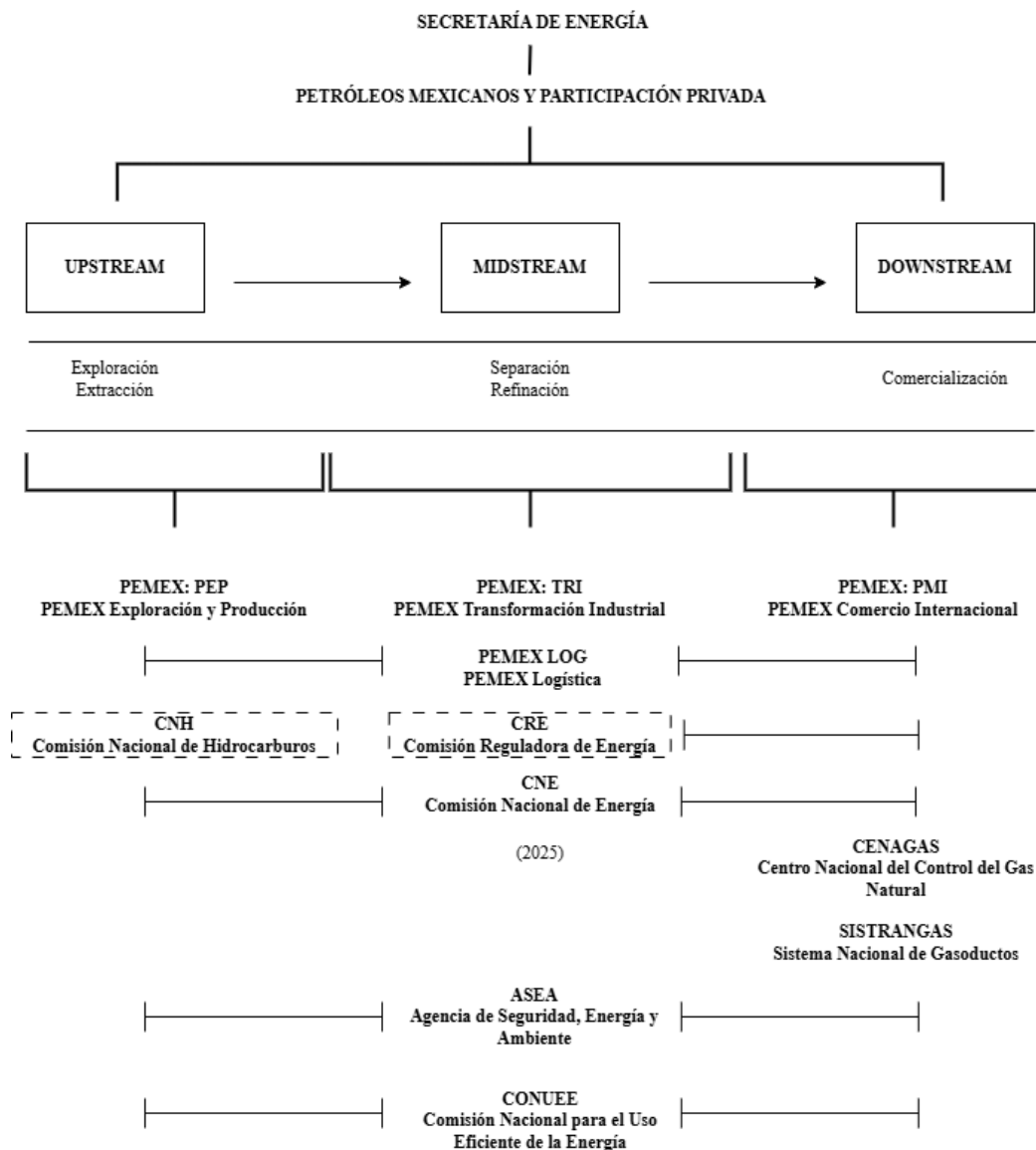


Figura 2.2. Cadena de valor del crudo. (SENER, 2023).

En la cadena de valor del crudo se inserta la iniciativa privada y la empresa pública del Estado, Petróleos Mexicanos, que participa en los tres eslabones productivos con la acción conjunta de sus organizaciones subsidiarias (PEP, PTRI, PTRI fertilizantes, PLOG y PMI). En suma, esta cadena demanda la acción equilibrada de múltiples organismos dependientes de la Secretaría de Energía. Puntualmente, la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente se encarga de proveer protección al ambiente por efecto de las actividades operativas de este mercado, mientras que la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía promueve el ahorro y aprovechamiento de la energía. En el área de exploración y extracción actúa la Comisión Nacional de Hidrocarburos, asignando contratos y licitaciones. Por lo que respecta a separación y refinación, la Comisión Reguladora de Energía supervisa la confiabilidad en los servicios de energía, participado simultáneamente en la sección de comercialización, y procurando aspectos técnicos y de tarifas vigentes en todo el país con relación a petrolíferos y electricidad. Sin embargo, en 2025 la nueva Comisión Nacional de Energía adquiere las funciones de la CNH y la CRE, promoviendo una transición regulatoria en sintonía con las demandas actuales de consumo energético.

2.2.1. Producción y reservas de crudo en México

Producción 2021	Hidrocarburos totales 1 780 MBPD	Petróleo crudo total general 1 665 MBPD
Producción 2022	Hidrocarburos totales 1 843 MBPD	Petróleo crudo total general 1 622 MBPD
Producción 2023	Hidrocarburos totales 1 961 MBPD	Petróleo crudo total general 1 665 MBPD
Producción 2024	Hidrocarburos totales 2 119 MBPD	Petróleo crudo total general 1758 MBPD

Tabla 2.4. Producción de crudo e hidrocarburos líquidos en México por zona (2021-2022) (PEMEX, 2024; CNH, 2023)

Reserva [MMBPCE]	Tipo de reserva ¹¹	2022	2023
Petróleo crudo equivalente	1P: Probadas	8 014	8 162
	2P: Probables	15 024	15 138
	3P: Posibles	22 161	23 081

Tabla 2.5. Reservas de petróleo crudo equivalente en México (CNH, 2023)

Finalmente, se encuentran las reservas del país, que contemplan la exploración terrestre y en aguas someras, siendo esta última producción la más favorable en la extracción de crudo con reservas del tipo 1P. No obstante, queda abierta una gran oportunidad en aguas profundas y reservas del tipo 3P.

¹¹ **1P-Reserva probada:** Cantidad de hidrocarburos que se pueden producir en el momento de la evaluación técnica y económica. **2P-Reserva probable:** Cantidad de hidrocarburos estimada en trampas perforadas y no perforadas que se localizan en áreas adyacentes a las productoras y al mismo nivel estratigráfico donde existen reservas probadas. **3P-Reserva posible:** Cantidad de hidrocarburos estimada en trampas no perforadas localizadas lejos de las zonas productoras y al mismo nivel estratigráfico de las reservas probada (SENER, 2023).

2.3. ASEGURAMIENTO DE FLUJO

El aseguramiento de flujo es un concepto técnico que popularizó la firma petrolera brasileña Petrobras a finales del siglo pasado. Este hace referencia a las operaciones que garantizan íntegramente el flujo de fluidos en la cadena de valor del crudo desde el yacimiento hasta las actividades finales de comercialización (Xing, L., et al., 2013).

Una de las cuatro preocupaciones básicas del aseguramiento de flujo es la inestabilidad del flujo, de esta se deriva el fenómeno cíclico de taponamiento, cuya formación ocurre en cuatro etapas: la acumulación del líquido en la tubería, el bloqueo de sección transversal en la tubería, evitando que el gas fluya, la penetración del gas y el escape del gas. Internamente el bloqueo en la tubería incrementa la presión en proporción a los flujos volumétricos que se están desplazando. Y con el trasiego de la interfaz líquido-gas, este último dispone del espacio en la tubería hasta que llega a la salida. El gas comprimido se expande y el líquido retorna al sistema de tuberías. La iteración de este proceso, desde la acumulación de líquido y hasta la expansión del gas y recuperación de líquido recibe el nombre de periodo de tapones, que tiene asociado una frecuencia de formación.

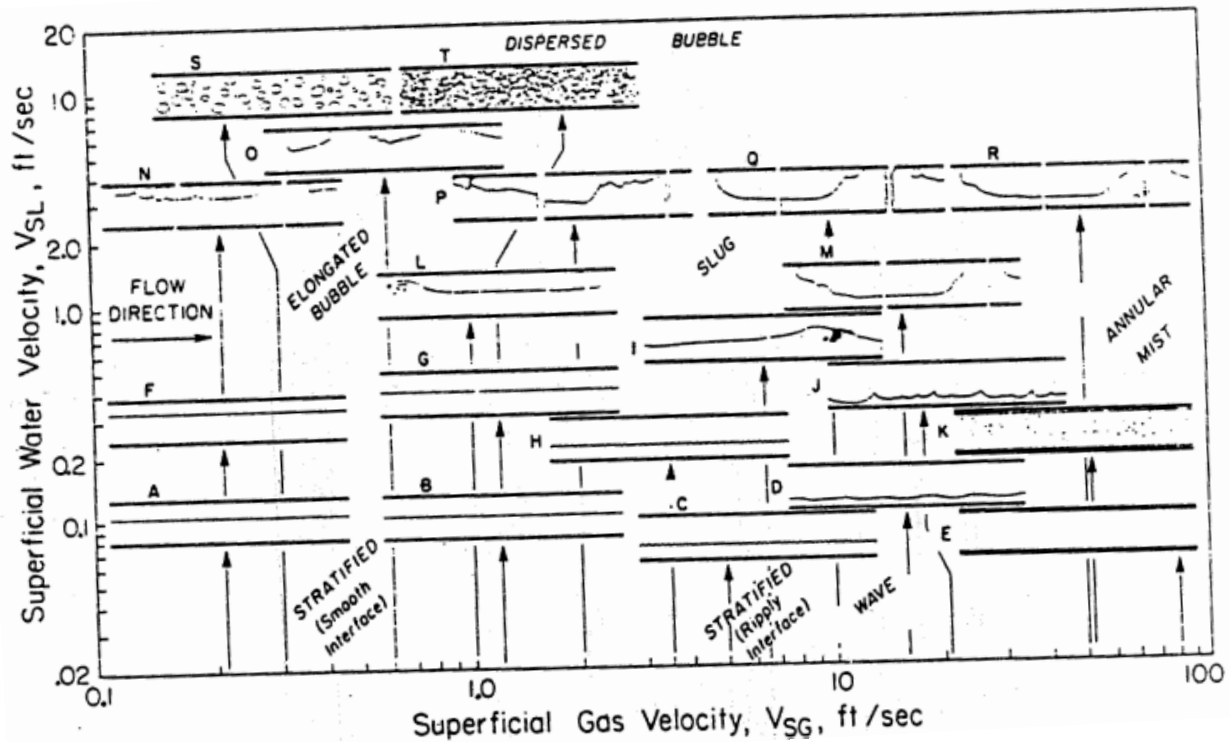
2.4. FLUJO MULTIFÁSICO: FLUJO BIFÁSICO LÍQUIDO-GAS

Una de las áreas mayormente desarrolladas en la Mecánica de Fluidos a lo largo de los últimos cincuenta años es la del flujo multifásico, que estudia el flujo simultáneo de dos o más fases inmiscibles entre ellas, considerando líquidos, sólidos y gases (Al-Safran Eissa, M., Brill J., P., 2017). En ella, las configuraciones más experimentadas han sido las del flujo bifásico líquido-gas, empleadas por investigadores referentes, puntualmente en la Universidad de Tulsa en Oklahoma Estados Unidos, donde subrayan la base física de las correlaciones más recientes, indicando que el grueso de estas se sustenta en el estudio de la variable conocida como velocidad superficial de los flujos de dos fases, la cual se define como la velocidad del fluido que se manifestaría si ese fluido fluyera aisladamente a lo largo de la tubería. (Brill J., P., Beggs H., D., 1991).

Por su parte, en este experimento se considera el análisis del flujo bifásico líquido-gas en tuberías de configuraciones horizontales. Trabajando con agua que responde a la ley de viscosidad de un fluido newtoniano y un gas que se modela de acuerdo con la ecuación de estado para los gases ideales.

2.4.1. Patrones de flujo bifásico en tuberías horizontales

De acuerdo con las investigaciones de la Universidad de Tulsa, la correcta identificación de patrones de flujo permite obtener las mejores aproximaciones referentes a la distribución de las fases en la tubería (Brill J., P., Beggs H., D., 1991). En flujo horizontal, la separación de las fases es más pronunciada a consecuencia de la dirección del flujo y la diferencia entre las densidades de las sustancias involucradas (agua y aire). La relación entre sus densidades, idealmente es la siguiente: $\rho_l \approx 1000(\rho_g)$, que en suma origina la manifestación de un patrón estratificado, un patrón base que ocurre con gastos moderados de líquidos y gas.



$$0.03 \left[\frac{m}{s} \right] \leq (V_{S1} = u_{s1}) \leq 6.1 \left[\frac{m}{s} \right], 0.03 \left[\frac{m}{s} \right] \leq (V_{Sg} = u_{sg}) \leq 30.5 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Figura 2.3. Patrón de flujo estratificado del flujo bifásico en tuberías horizontales con relación a las velocidades superficiales de las fases (Brill J., P., Beggs H., D., 1991).

Después de haber definido la condición estratificada a la que se somete el flujo horizontal, años más tarde se complementó la identificación de patrones, detallando el tipo de patrón sobre el cual se tiene la manifestación de los tapones, es decir, el patrón de flujo intermitente.

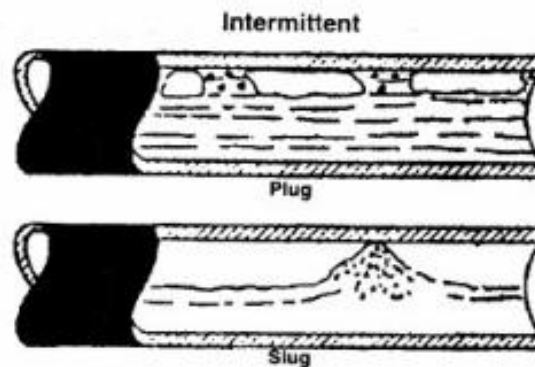


Figura 2.4. Patrón de flujo intermitente (Brill J., P., Mukherjee, H., 1999).

El patrón de flujo intermitente suele ser considerando un patrón intermedio con relación a las proporciones de las fases y sus velocidades superficiales. Ver figura 2.4. En el tipo bache, la presencia de cúmulos de gas suele tener mayor presencia en la parte superior de la tubería, sin un tamaño en específico, pero con la tendencia a manifestarse en grupos. Mientras que en el tipo tapón se manifiestan tapones de líquido que adquieren velocidades superiores a las de la fase líquida total, con una presencia cíclica en las fluctuación de presión como un distintivo clave para este fenómeno (Hoogendoorn C. J., 1959). Estos tapones tienden a bloquear por completo el área de sección transversal de la tubería, además de que se les suele acompañar de un grupo de otros tapones con tamaños más pequeños y mayor presencia de aire (Brill J., P., Mukherjee, H., 1999).

2.4.2. Correlaciones predictivas para la frecuencia de tapones en flujo bifásico horizontal líquido-gas de baja viscosidad

En virtud de los alcances sobre los que se desarrolla el presente experimento, enseguida se enuncia un grupo de correlaciones fundamentales para el entendimiento del patrón de flujo intermitente sobre el cual se manifiestan los tapones líquidos y la predicción de su frecuencia de formación asociada.

En la práctica se ha observado que la manifestación de los tapones considera cuerpos líquidos con presencia de gas. Generalmente a esta condición se le denomina condición de cuerpo aerado, que en realidad describe al cuerpo del tapón, en tanto el cúmulo estratificado de gas-líquido que trae consigo se denomina película del tapón (Archibong-Eso, A., et al., 2018). Por su parte, el interés por predecir la frecuencia de estos tapones se tiene para el diseño y manejo de la integridad mecánica de las líneas de tuberías en sistemas integrales de producción. Las primeras correlaciones experimentales para casos de baja viscosidad comenzaron a desarrollarse en la segunda mitad del siglo pasado. Una de las más importantes se trabajó en una tubería de 0.019 [m] de diámetro interno, con agua y dióxido de carbono. La expresión predictiva en función del diámetro y el número adimensional de Froude¹² se muestra a continuación (Gregory, G. A., Scott, D. S., 1969):

$$f_s = 0.0226 \left(\frac{V_{SL}}{gD} \right)^{1.2} \left(\frac{19.75}{V_M} + V_M \right)^{1.2} \quad (2.1)$$

Años más tarde, esta correlación se modificó notablemente al introducir los efectos de la retención de líquido en la tubería (Greskovich, E. J., Shrier, A. L., 1972). Dando como resultado la siguiente expresión:

$$f_s = 0.0226 \left(\frac{V_{SL}}{V_M} \right)^{1.2} \left(\frac{19.75}{D} + \frac{V_M^2}{gD} \right)^{1.2} \quad (2.2)$$

¹² El número de Froude representa un cociente entre la fuerza inercial y la gravitacional. Esto es:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

Donde V, g, D, son asignados a la velocidad del flujo, la aceleración debida a la gravedad y el diámetro de la tubería en la que se manifiesta.

Donde los términos f_s , V_{SL} , V_M , g , D , corresponden a la frecuencia de los tapones, la velocidad superficial de la fase líquida, la velocidad superficial de la mezcla, la aceleración debida a la gravedad y el diámetro interno de la tubería respectivamente. Adoptando la nomenclatura de este texto a las expresiones 2.1 y 2.2 se tiene lo siguiente:

$$f_t = 0.0226 \left(\frac{u_{sl}}{gD_{int}} \right)^{1.2} \left(\frac{19.75}{u_{sm}} + u_{sm} \right)^{1.2} \quad (2.3)$$

$$f_t = 0.0226 \left(\frac{u_{sl}}{u_{sm}} \right)^{1.2} \left(\frac{19.75}{D_{nom}} + \frac{u_{sm}^2}{gD_{int}} \right)^{1.2} \quad (2.4)$$

Queda expreso del modelo 2.4 la influencia directamente proporcional de la velocidad superficial de la mezcla bifásica, y la relación inversamente proporcional con el diámetro de la tubería. Dando paso a otra correlación que involucra la velocidad superficial de la mezcla como principal aporte a la predicción de la frecuencia (Heywood, N. I., Richardson, J. F., 1979):

$$f_s = 0.0434 \left[\left(\frac{V_{SL}}{gD} \right) \left(\frac{19.75}{V_M} + V_M \right) \right]^{1.2} \quad (2.5)$$

A finales del siglo pasado se propusieron correlaciones que no consideraban el aporte directo del contenido de gas, y en consecuencia la velocidad superficial de la mezcla, esto para velocidades superficiales de líquido muy alto (Nydal, O. J., et al., 1992):

$$f_s = \frac{0.088(V_{SL} + 1.5)^2}{gD} \quad (2.6)$$

Con la nomenclatura de este texto, las expresiones 2.5 y 2.6 quedan como:

$$f_t = 0.0434 \left[\left(\frac{u_{sl}}{gD_{int}} \right) \left(\frac{19.75}{u_{sm}} + u_{sm} \right) \right]^{1.2} \quad (2.7)$$

$$f_t = \frac{0.088(u_{sl} + 1.5)^2}{gD_{int}} \quad (2.8)$$

De acuerdo con los modelos 2.3, 2.4, 2.7 y 2.8 se traza una guía de referencia en el capítulo 6 para los resultados que se obtuvieron en la formación de tapones y su frecuencia asociada.

CAPÍTULO 3. LABORATORIO DE FLUJO MULTIFÁSICO IINGEN, UNAM

El Instituto de Ingeniería de la UNAM incorpora a sus instalaciones un circuito experimental para el estudio y visualización de fenómenos asociados al flujo multifásico horizontal. Este es capaz de operar en condiciones de inyección de líquido de alta y baja viscosidad. En suma, el circuito se integra por cinco subsistemas coordinados, los cuales se describen a continuación.

3.1. SUBSISTEMA HIDRÁULICO

Como primer elemento en el subsistema, se tiene el tanque de almacenamiento de líquidos. Este tiene una capacidad total de $1.1 \text{ [m}^3\text{]}$ y se conecta a la bomba de desplazamiento positivo hidráulica del tipo rotatoria con tornillo de cavidad progresiva, de la marca SEEPEX. La cual es capaz de ejecutar el trasiego de líquidos de hasta $\mu = 10 \text{ [Pas]}$ a un gasto volumétrico máximo de $\dot{Q}_1 = 35 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] = 9.72 \left[\frac{\text{l}}{\text{s}} \right]$, a 350 [rpm]. La frecuencia de operación del motor eléctrico de la bomba es controlada mediante un variador de frecuencia. El motor se protege industrialmente con un interruptor termomagnético y su respectivo fusible de alto empeño.

A la salida de la bomba y antes de la entrada al inyector trifásico se tiene un medidor de masa sobre la línea de la fase líquida de la marca Endress + Hausser, el cual emplea el principio de Coriolis para determinar el gasto másico de la línea.

Elementos del subsistema hidráulico
Interruptor termomagnético
Fusible de ultra alto empeño
ABB: Variador de frecuencia
SEEPEX: Bomba de cavidad progresiva autocebante BN 35-24, 40 [hp]
Tanque de polietileno 1.1 [m ³]
Válvulas de esfera
Inyector trifásico
E+H: Medidor de flujo másico 2 [in], Coriolis - Promass 83F

Tabla 3.1. Elementos del subsistema hidráulico (IINGEN UNAM, 2025).

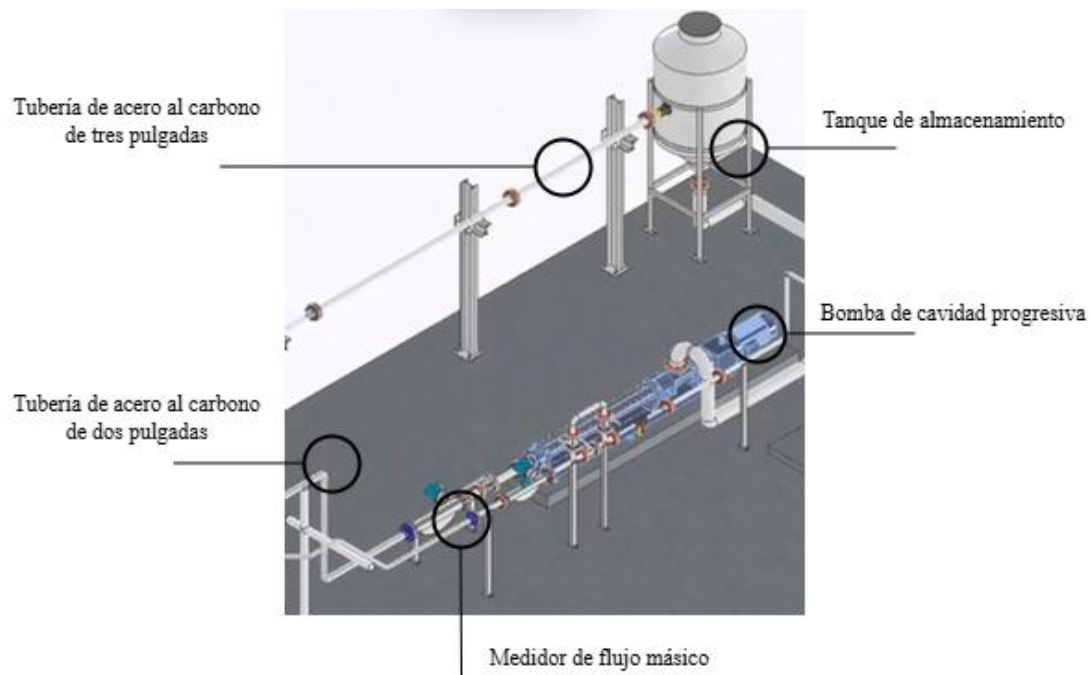


Figura 3.1. Subsistema hidráulico (IINGEN UNAM, 2025).

3.2. SUBSISTEMA NEUMÁTICO

El subsistema de aire atmosférico opera en primera instancia con un compresor de desplazamiento positivo rotatorio de tornillo, con una presión de trabajo de $P_{op} = 217$ [psig]. Este mismo se acopla a un acumulador de aire comprimido con capacidad de almacenamiento de $1 \text{ [m}^3\text{]}$ a una presión de trabajo de $P = 16$ [bar] = 1.6 [MPa]. Por su parte, estos dos dispositivos de flujo se interconectan con la línea de aire, la cual integra un medidor de masa de la marca Endress + Hauser.

Elementos del subsistema neumático	
KAESER: Compresor rotatorio (air center)	
Motor eléctrico SK-20, 20 [hp]	
Otto Klein: Acumulador de aire comprimido	
D-57223, $1 \text{ [m}^3\text{]}$ a 16 [bar]	
E+H: Medidor de flujo másico	
Coriolis - Promass 83F	
2 [in], altos flujos	
E+H: Medidor de flujo másico	
Coriolis - Promass 83F	
0.5 [in], bajos flujos	

Tabla 3.2. Elementos del subsistema neumático (IINGEN UNAM, 2025).

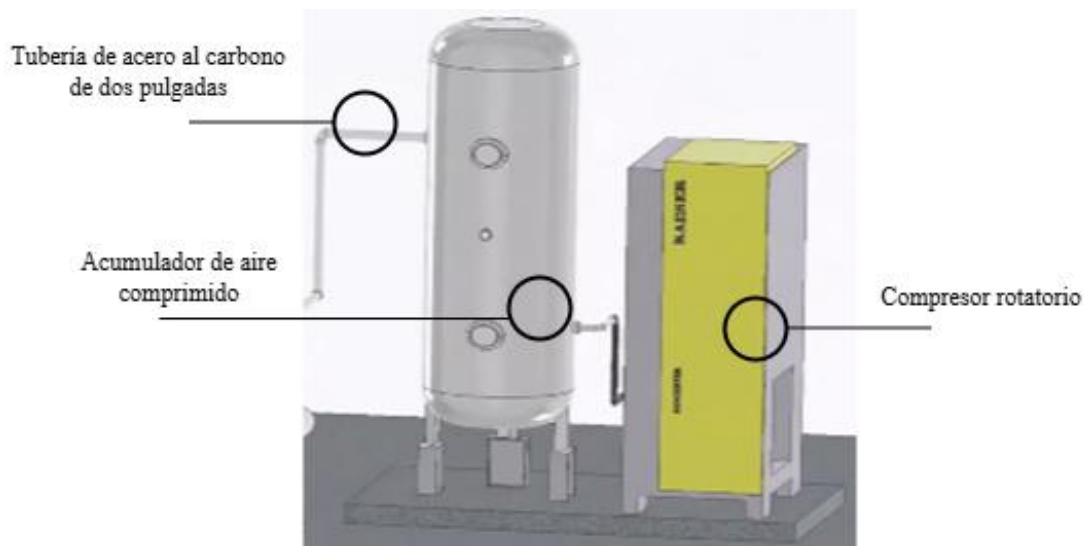


Figura 3.2. Subsistema neumático (IINGEN UNAM, 2025).

3.3. SUBSISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

La cuantificación de las variables a estudiar en el circuito experimental se registra con la instrumentación correspondiente. Particularmente en este experimento, la prioridad es la interpretación de las señales de presión sobre la columna del flujo bifásico líquido-gas. Para ello se instrumenta el subsistema de visualización de pruebas con cuatro transductores industriales de presión de la marca TE Connectivity. Estos cuentan con una banda de exactitud de $\pm 1\%$, un rango de temperaturas de: $-40[^\circ\text{C}] \leq T \leq +125 [^\circ\text{C}]$, y una lectura máxima de presión de 15 [psi].

Dichos transductores se conectan al módulo de adquisición de la marca IMC, y son interpretados desde el software IMC Studio. Físicamente el transductor de presión convierte las señales de presión en señales eléctricas analógicas en corriente directa $0 [\text{mA}] < i \leq 20 [\text{mA}]$, las cuales son recibidas por el módulo de adquisición en circuito cerrado. Además, en complemento a los transductores de presión, se tienen sensores de temperatura ambientales que monitorean los experimentos de la campaña experimental.

Elementos del subsistema de adquisición de datos experimentales

Software: IMC Studio

IMC: Módulo de adquisición Cronos flex, 5 módulos con 8 canales
--

Sensores de temperatura

TE Connectivity: Transductores de presión U 5 300, 24 [V] corriente directa
--

Tabla 3.3. Elementos del subsistema de adquisición (IINGEN UNAM, 2025).

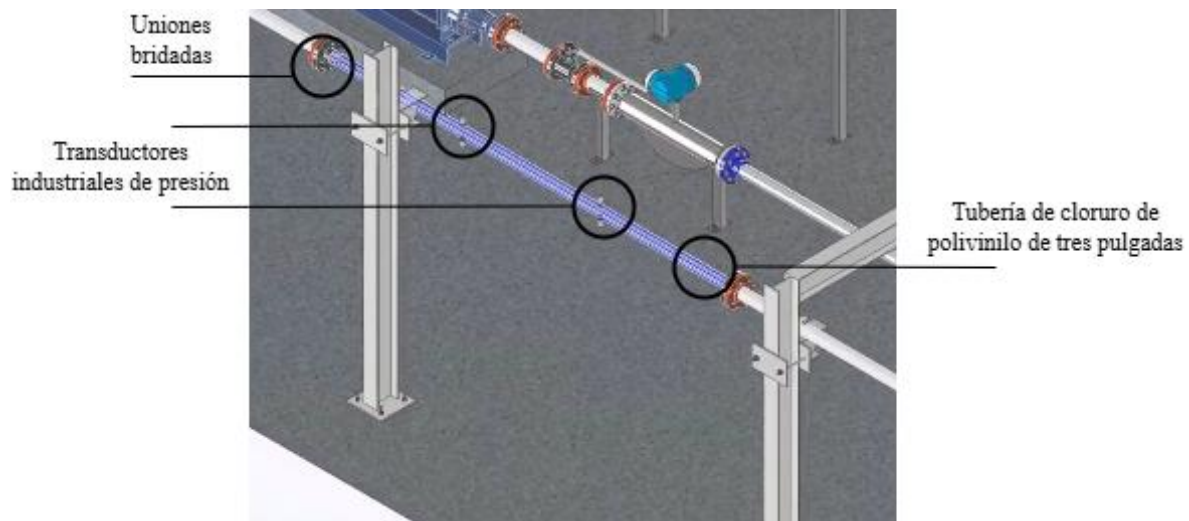


Figura 3.3. Subsistema de adquisición (IINGEN UNAM, 2025).

3.4. SUBSISTEMA DE PRUEBAS

El subsistema de pruebas se conforma por líneas de tubería de acero al carbono sin costura de diámetro nominal de $7.62 \text{ [cm]} = 0.0762 \text{ [m]}$, de cédula 80. En total se tienen quince tramos intercambiables que integran 50 [m] de longitud total en el circuito experimental. Entre los elementos mecánicos de unión se tienen uniones bridadas de encastre soldable y válvulas de esfera para la regulación de las líneas de flujo. Esta estructura se sostiene en vigas de acero de IPR con dimensiones de $6 \text{ [in]} \times 4 \text{ [in]}$.

Elementos del subsistema de pruebas
Tubería de acero al carbón sin costuras 0.5 [in] de cédula 40, 2 500 [psi]
Unión bridada de encastre soldable Norma: ANSI B 16.5
Worcester: Válvula de esfera Clase 150
Soporte de acero IPR, 6 [in] x 4 [in]

Tabla 3.4. Elementos del subsistema de pruebas (IINGEN UNAM, 2025).

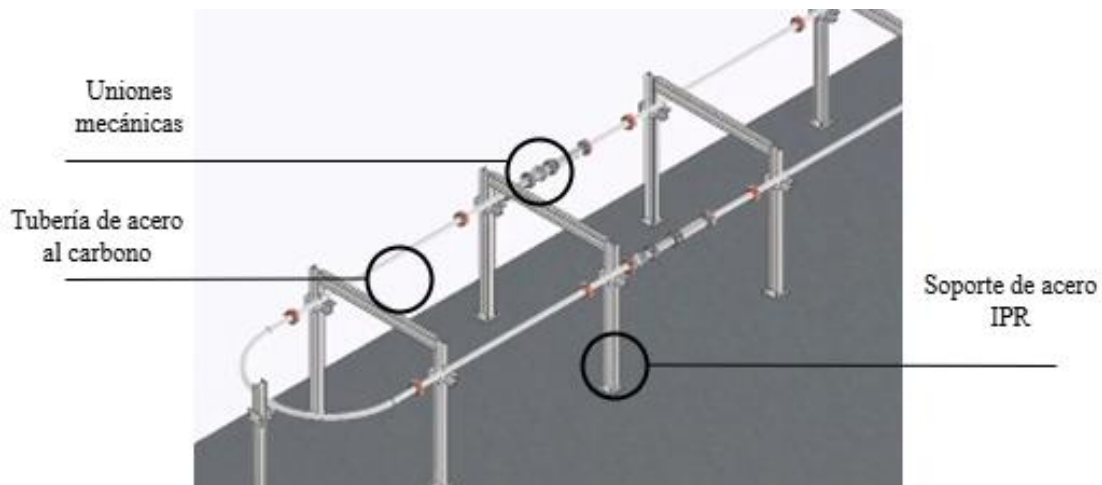


Figura 3.4. Subsistema de pruebas (IINGEN UNAM, 2025).

3.5. SUBSISTEMA DE VISUALIZACIÓN DE PRUEBAS

Por su parte, el subsistema de visualización de pruebas resulta ser una región de tubería de cloruro de polivinilo de cédula 40 con $D_{nom} = 7.62 \text{ [cm]} = 0.0762 \text{ [m]}$. En este se realizó la instalación mecánica de los transductores de presión, acomodados en dos pares que tienen una separación de un metro de distancia entre ellos. A su vez, esta sección se acopla a las líneas de acero al carbono.

Elemento
Tubo de cloruro de polivinilo Cédula 40, 3 [in]
Sellos de politetrafluoroetileno

Tabla 3.5. Elementos del subsistema de visualización de pruebas (IINGEN UNAM, 2025).

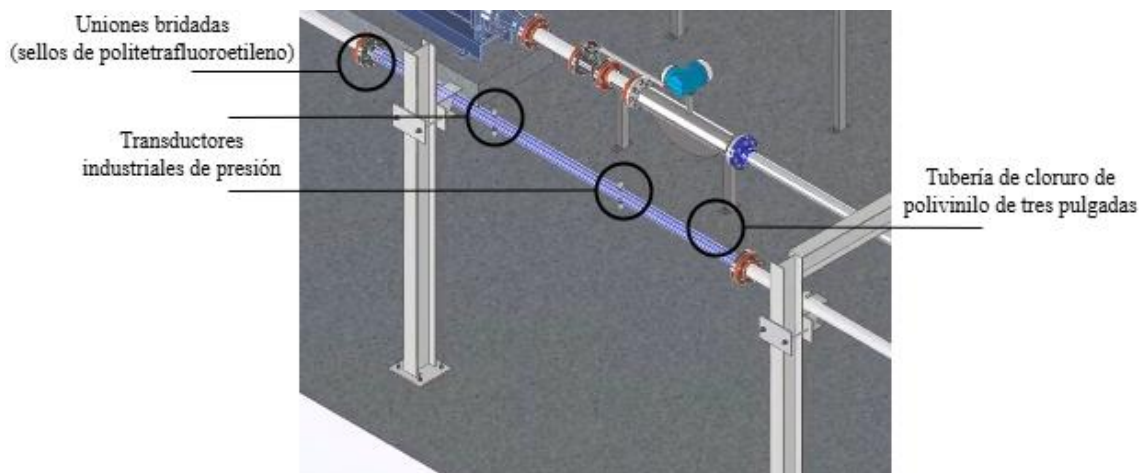


Figura 3.5. Subsistema de visualización de pruebas (IINGEN UNAM, 2025).

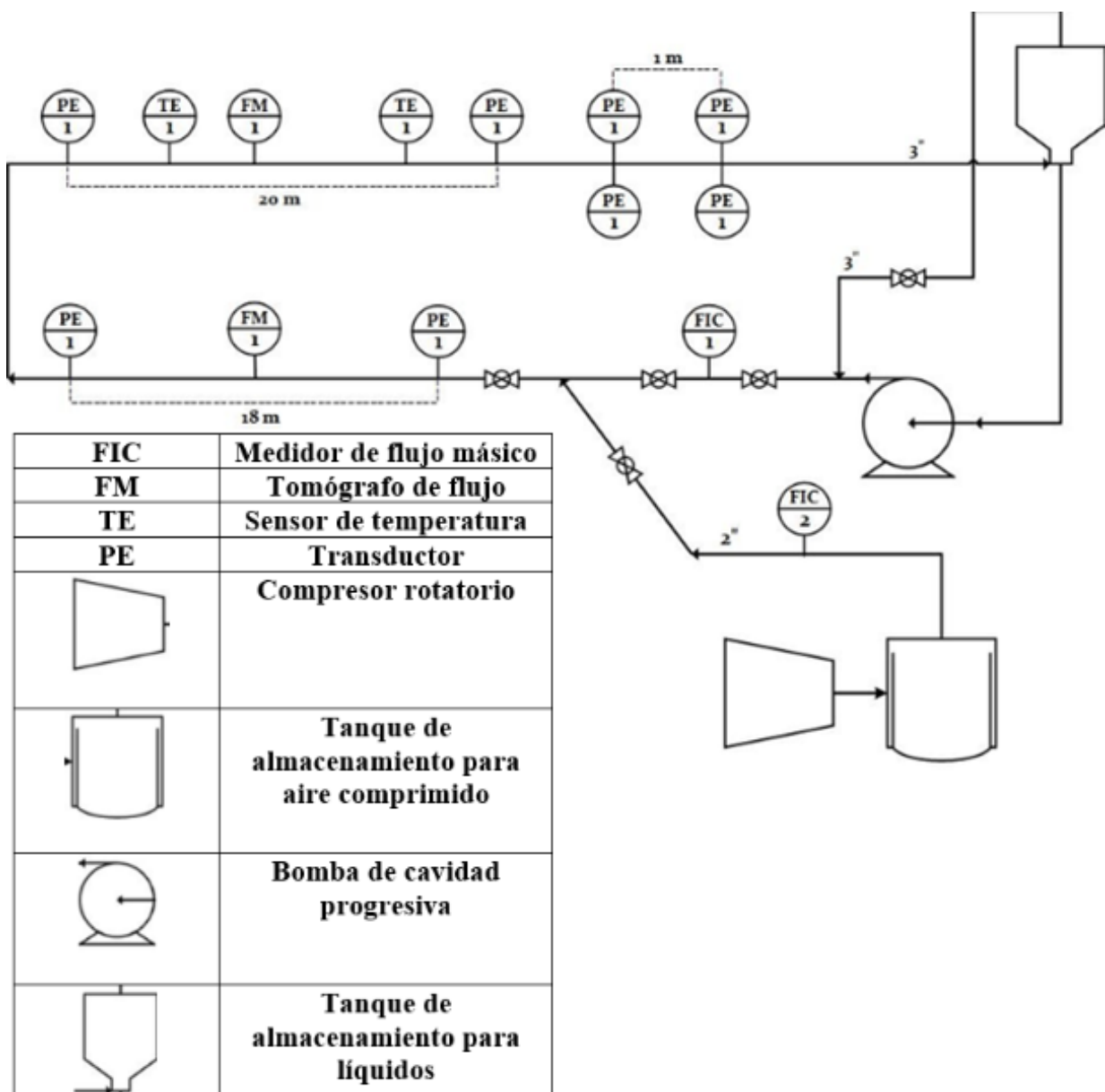


Figura 3.6. Diagrama de proceso: circuito experimental del Laboratorio de Flujo Multifásico IINGEN (IINGEN UNAM, 2025).

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN

4.1. MATRIZ EXPERIMENTAL

Una vez que se identifica correctamente el planteamiento del problema relacionado con el aseguramiento de flujo multifásico, en segundo lugar se delimitan apropiadamente los alcances del experimento. Estos se adecúan a las condiciones operativas del circuito del Laboratorio de Flujo Multifásico y sus eventos se integran a la siguiente matriz experimental donde se configura el caudal de bombeo de líquido (agua) y su respectiva inyección de gas (aire comprimido) para establecer la mezcla bifásica líquido-gas. Ver tabla 4.1.

		$\dot{m}_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$				
		0.005	0.010	0.015	0.020	0.025
$\dot{m}_l \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$	1	1¹³ (1, 0.005)	2 (1, 0.010)	3 (1, 0.015)	4 (1, 0.020)	5 (1, 0.025)
	2	6 (2, 0.005)	7 (2, 0.010)	8 (2, 0.015)	9 (2, 0.020)	10 (2, 0.025)
	3	11 (3, 0.005)	12 (3, 0.010)	13 (3, 0.015)	14 (3, 0.020)	15 (3, 0.025)
	4	16 (4, 0.005)	17 (4, 0.010)	18 (4, 0.015)	19 (4, 0.020)	20 (4, 0.025)
	5	21 (5, 0.005)	22 (5, 0.010)	23 (5, 0.015)	24 (5, 0.020)	25 (5, 0.025)

Tabla 4.1. Matriz experimental de referencia con 25 eventos de la mezcla bifásica líquido-gas.

4.2. VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL FLUJO BIFÁSICO LÍQUIDO-GAS

En miras a constituir un marco de referencia con valores teóricos respecto a la velocidad superficial de la mezcla bifásica, para cada uno de los veinticinco eventos que conforman la matriz experimental se realizan los siguientes cálculos que determinan las velocidades superficiales de las fases así como de la mezcla bifásica líquido-gas. El compendio de estos resultados se muestra en la tabla 4.2.

¹³ Los cinco elementos que sobresalen de la matriz experimental corresponden a la diagonal principal. Los cuales resultan ser los eventos más representativos de todo el conjunto.

Condiciones del experimento:

Para el registro de la temperatura se toma la siguiente expresión para obtener el valor más representativo. Esto con base en la posición de los dos sensores de temperatura, que se ubican antes de la tubería de visualización.

$$T_{\text{exp}}[^{\circ}\text{C}] = \frac{\overline{T_{\text{sensor1}}} + \overline{T_{\text{sensor2}}}}{2} \quad (4.1)$$

$$T_{\text{exp}} [\text{K}] = T_{\text{exp}}[^{\circ}\text{C}] + 273.15$$

Por su parte, la obtención de la presión representativa de flujo se obtiene con la siguiente expresión, la cual considera el aporte de cuatro transductores de presión, colocados antes y después de la sección de retorno en el circuito experimental, más el aporte de la presión atmosférica en el lugar del experimento¹⁴:

$$P_{\text{exp}}[\text{psi}] = \frac{\overline{P_{\text{transductor1}}} + \overline{P_{\text{transductor2}}} + \overline{P_{\text{transductor3}}} + \overline{P_{\text{transductor4}}}}{4} + P_{\text{atm}}[\text{psi}] \quad (4.2)$$

$$P_{\text{exp}}[\text{Pa}] = (P_{\text{exp}}[\text{psi}])(6894.76)$$

Se tiene un diámetro interno de la tubería de 2.9 [in], cédula 80, y área de sección transversal como se muestra a continuación:

$$D_{\text{int}} = 7.366 [\text{cm}] = 0.07366 [\text{m}]$$

$$\begin{aligned} A_{\text{st}} [\text{m}^2] &= \frac{\pi}{4} (0.07366 [\text{m}])^2 \\ &= 0.004261 [\text{m}^2] \end{aligned}$$

Velocidad de la fase líquida:

En flujo multifásico, la densidad de la fase líquida depende de la temperatura, los sólidos, gases y aceites disueltos. Sin embargo, para estos cálculos se toma como referencia la temperatura promedio de la fase líquida en toda la campaña experimental y se desprecia la disolución de otras fases:

$$\begin{aligned} \rho_l \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] &= 1\,000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \\ u_{\text{sl}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] &= \frac{\dot{Q}_l \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}{A_{\text{st}} [\text{m}^2]} = \frac{\frac{\dot{m}_l \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]}{\rho_l \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}}{A_{\text{st}} [\text{m}^2]} \quad (4.3) \end{aligned}$$

Velocidad superficial de la fase gaseosa:

La densidad de la fase gaseosa se calcula a partir de la ecuación de estado de los gases ideales, como una función de la presión y la temperatura absolutas:

¹⁴ Presión atmosférica de 77 000 [Pa] en Coyoacán Ciudad de México, México.

$$\rho_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{P_{\text{atm}} [\text{Pa}]}{R \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right] T_{\text{amb}} [\text{K}]} \quad (4.4)$$

$$u_{\text{sg}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \frac{\dot{Q}_g \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}{A_{\text{st}} [\text{m}^2]} = \frac{\frac{\dot{m}_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]}{\rho_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}}{A_{\text{st}} [\text{m}^2]} \quad (4.5)$$

Velocidad superficial de la mezcla bifásica:

$$u_{\text{sm}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = u_{\text{sl}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] + u_{\text{sg}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \frac{\dot{Q}_l \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}{A_{\text{st}} [\text{m}^2]} + \frac{\dot{Q}_g \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]}{A_{\text{st}} [\text{m}^2]} \quad (4.6)$$

Para el cálculo de las velocidades superficiales del flujo bifásico en cada uno de los eventos, se toman como referencia los promedios de los flujos másicos de cada fase y de la temperatura en el sistema de tuberías. Obteniéndose la siguiente información:

	Ref ¹⁵ ($\dot{m}_g$) $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ Prom ¹⁶ ($\dot{m}_g$) $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$	Ref($\dot{m}_l$) $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ Prom($\dot{m}_l$) $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$	P _{exp} [psi] P _{exp} [Pa]	T _{exp} [°C] T _{exp} [K]	$\rho_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$u_{\text{sg}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$u_{\text{sl}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$u_{\text{sm}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
1	0.005 - 0.00624	1 - 1.01	0.22 - 1516.85	21.14 - 294.29	0.93	1.57	0.24	1.81
2	0.010 - 0.01021	1 - 1.006	0.39 - 2688.95	21.54 - 294.69	0.93	2.58	0.24	2.82
3	0.015 - 0.0154	1 - 1.38	0.57 - 3930.01	19.43 - 292.58	0.96	3.75	0.32	4.07
4	0.020 - 0.02107	1 - 1.008	0.59 - 4067.91	19.63 - 292.78	0.96	5.12	0.24	5.36
5	0.025 - 0.0245	1 - 1.005	0.66 - 4550.54	19.70 - 292.85	0.97	5.92	0.24	6.16

¹⁵ Indica que es el valor de referencia que se mostró en la tabla 4.1.

¹⁶ Indica que es el valor promedio que se tomó para realizar la memoria de cálculo de la tabla 4.2.

6	0.005	2	0.51	21.19	0.95	1.53	0.47	2.01
	-	-	-	-				
	0.00622	2.02	3516.33	294.34				
7	0.010	2	0.85	21.55	0.98	2.44	0.47	2.92
	-	-	-	-				
	0.01021	2.01	5860.54	294.70				
8	0.015	2	1.21	19.34	1.01	3.54	0.47	4.01
	-	-	-	-				
	0.01535	2.008	8342.66	292.49				
9	0.020	2	1.51	19.55	1.04	4.75	0.47	5.23
	-	-	-	-				
	0.02108	2.027	10411.08	292.70				
10	0.025	2	0.66	19.70	0.97	5.92	0.23	6.16
	-	-	-	-				
	0.0245	1.005	4550.54	292.85				
11	0.005	3	0.91	21.28	0.98	1.48	0.71	2.20
	-	-	-	-				
	0.00624	3.033	6274.23	294.43				
12	0.010	3	1.39	21.62	1.02	2.33	0.71	3.04
	-	-	-	-				
	0.01017	3.017	9583.71	294.77				
13	0.015	3	1.92	19.40	1.07	3.31	0.70	4.01
	-	-	-	-				
	0.01517	2.98	13237.93	292.55				
14	0.020	3	2.47	19.52	1.11	4.48	0.71	5.19
	-	-	-	-				
	0.02138	3.016	17030.05	292.67				
15	0.025	3	2.79	19.32	1.14	5.00	0.71	5.72
	-	-	-	-				
	0.02447	3.030	19236.37	292.47				
16	0.005	4	1.37	21.18	1.02	1.43	0.95	2.38
	-	-	-	-				
	0.006242	4.043	9445.82	294.33				
17	0.010	4	2.01	21.72	1.07	2.23	0.95	3.18
	-	-	-	-				
	0.01020	4.036	13858.46	294.87				

18	0.015	4	2.15	19.51	1.09	3.22	0.95	4.17
	-	-	-	-				
	0.01502	4.052	14823.73	292.66				
19	0.020	4	3.43	19.59	1.19	4.11	0.95	5.06
	-	-	-	-				
	0.02101	4.050	23649.02	292.74				
20	0.025	4	3.89	19.56	1.23	4.64	0.95	5.59
	-	-	-	-				
	0.02443	4.042	26820.61	292.71				
21	0.005	5	1.92	21.57	1.06	1.36	1.18	2.54
	-	-	-	-				
	0.00617	5.052	13237.93	294.72				
22	0.010	5	2.51	21.84	1.11	2.14	1.10	3.24
	-	-	-	-				
	0.01017	4.683	17305.84	294.99				
23	0.015	5	3.54	19.65	1.21	2.89	1.19	4.08
	-	-	-	-				
	0.01495	5.055	24407.44	291.80				
24	0.020	5	4.49	19.73	1.28	3.83	1.18	5.01
	-	-	-	-				
	0.02097	5.047	30957.46	292.88				
25	0.025	5	4.99	19.66	1.32	4.33	1.18	5.52
	-	-	-	-				
	0.02448	5.047	34404.84	292.81				

Tabla 4.2. Velocidades superficiales del flujo bifásico líquido-gas.

Con todo ello, a continuación se expone la matriz experimental, que muestra los gastos másicos que realmente se reprodujeron en el laboratorio respecto a los valores de referencia, al igual que las velocidades de la mezcla en la diagonal principal (experimentos 1, 7, 13, 19 y 25).

		$\dot{m}_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$				
		0.005	0.010	0.015	0.020	0.025
$\dot{m}_l \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$	1	1 (1.01, 0.00624) $u_{sm} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ 1.81	2 (1.006, 0.01021)	3 (1.38, 0.0154)	4 (1.008, 0.02107)	5 (1.005, 0.0245)
	2	6 (2.02, 0.00622)	7 (2.01, 0.01021) $u_{sm} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ 2.92	8 (2.008, 0.01535)	9 (2.027, 0.02108)	10 (1.005, 0.0245)
	3	11 (3.033, 0.00624)	12 (3.017, 0.01017)	13 (2.98, 0.01517) $u_{sm} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ 4.01	14 (3.0164, 0.02138)	15 (3.0303, 0.02447)
	4	16 (4.043, 0.006242)	17 (4.036, 0.01020)	18 (4.052, 0.01502)	19 (4.050, 0.02101) $u_{sm} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ 5.06	20 (4.042, 0.02443)
	5	21 (5.052, 0.00617)	22 (4.683, 0.01017)	23 (5.055, 0.01495)	24 (5.047, 0.02097)	25 (5.047, 0.02448) $u_{sm} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ 5.52
		2.67	3.86	5.08	5.83	
		1.90	3.80	4.95	5.83	
		2.08	2.88	4.91	5.41	
		2.25	3.01	3.95	5.29	
		2.41	3.07	3.87	4.75	

Tabla 4.3. Matriz experimental promedio de velocidades superficiales del flujo bifásico líquido-gas.

4.3. VELOCIDAD LOCAL DE TAPONES EN EL FLUJO BIFÁSICO LÍQUIDO-GAS: INSTALACIÓN DE TRANSDUCTORES DE PRESIÓN

Para lograr la cuantificación de las velocidades locales de los tapones que se generan en el flujo bifásico, se instrumenta la tubería del subsistema de visualización de pruebas con cuatro transductores de presión en dos pares. Estos se instalan a un metro de separación y posteriormente se realizan las conexiones de alambrado al adquisidor de señales. Ver figura 4.1.

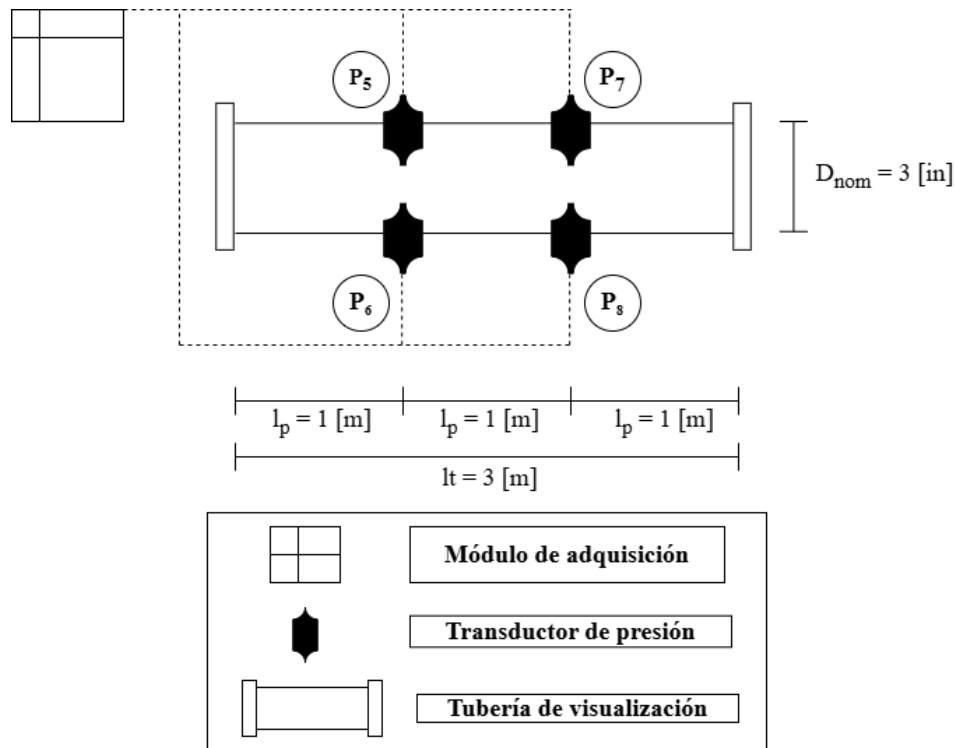
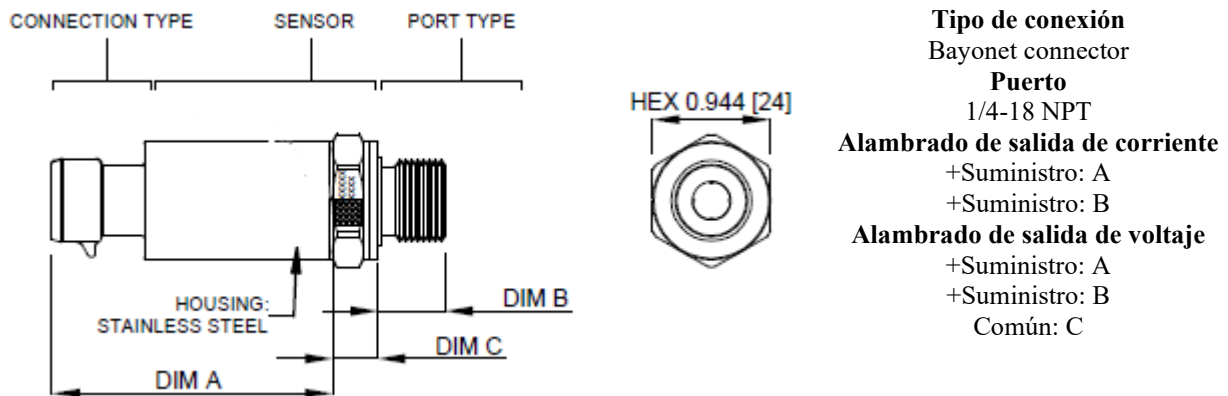


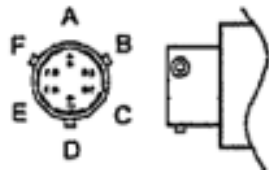
Figura 4.1. Instrumentación en el subsistema de visualización de pruebas.

La instalación mecánica de los transductores de presión se realiza en dos pasos, primeramente la perforación de la tubería con una broca de 1/2 [in] y posteriormente el machuelado de la misma con un machuelo de 1/4 [in]. Una vez que se mecanizan e instalan los transductores, se verifica la penetrabilidad de flujo con una corrida de líquido a una frecuencia de bombeo saturada equivalente a 50 [Hz].

El siguiente paso en la ruta de trabajo es el cableado de los transductores a los canales del módulo de adquisición de señales. Las conexiones se instalan de acuerdo con la hoja de especificaciones del fabricante. Ver figura 4.2. Con las cuales se tienden cuatro líneas de 5 [m] de alambre calibre 24 en nomenclatura AWG.



BAYONET CONNECTOR



Señal de salida
 $4 \text{ [mA]} \leq i \leq 20 \text{ [mA]}$
 Suministro de diferencial de
 voltaje

$9 \text{ [V]} \leq V \leq 30 \text{ [V]}$

Rango de presión
 $P \leq 15 \text{ [psi std]}$

Figura 4.2. Conexiones del transductor U 5300. TE Connectivity (2022). TE Connectivity.
<https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrv&DocNm=U5300&DocType=Data+Sheet&DocLang=English&DocFormat=pdf&PartCntxt=CAT-PTT0026>.

Finalmente, para la instalación de transductores, se realiza la verificación de las conexiones eléctricas en cada uno de los puertos para los sensores de presión. Esto con el apoyo de un generador de señales que opera en un rango de corriente eléctrica de $4 \text{ [mA]} \leq i \leq 20 \text{ [mA]}$. Entonces si consideramos un circuito cerrado entre los transductores de presión, el modulador de corriente, el módulo de adquisición y una fuente de voltaje de 24 [V] , emulamos las siguientes condiciones para cada uno de los transductores:

Prueba	$i \text{ [mA]}$	$V \text{ [mV]}$	$R \text{ [m}\Omega\text{]}$
1	4 [mA]	200 [mV]	50 [mΩ]
2	8 [mA]	400 [mV]	50 [mΩ]
3	12 [mA]	600 [mV]	50 [mΩ]
4	16 [mA]	800 [mV]	50 [mΩ]
5	20 [mA]	1000 [mV]	50 [mΩ]

Tabla 4.4. Verificación del cableado eléctrico con el emulador de corriente.

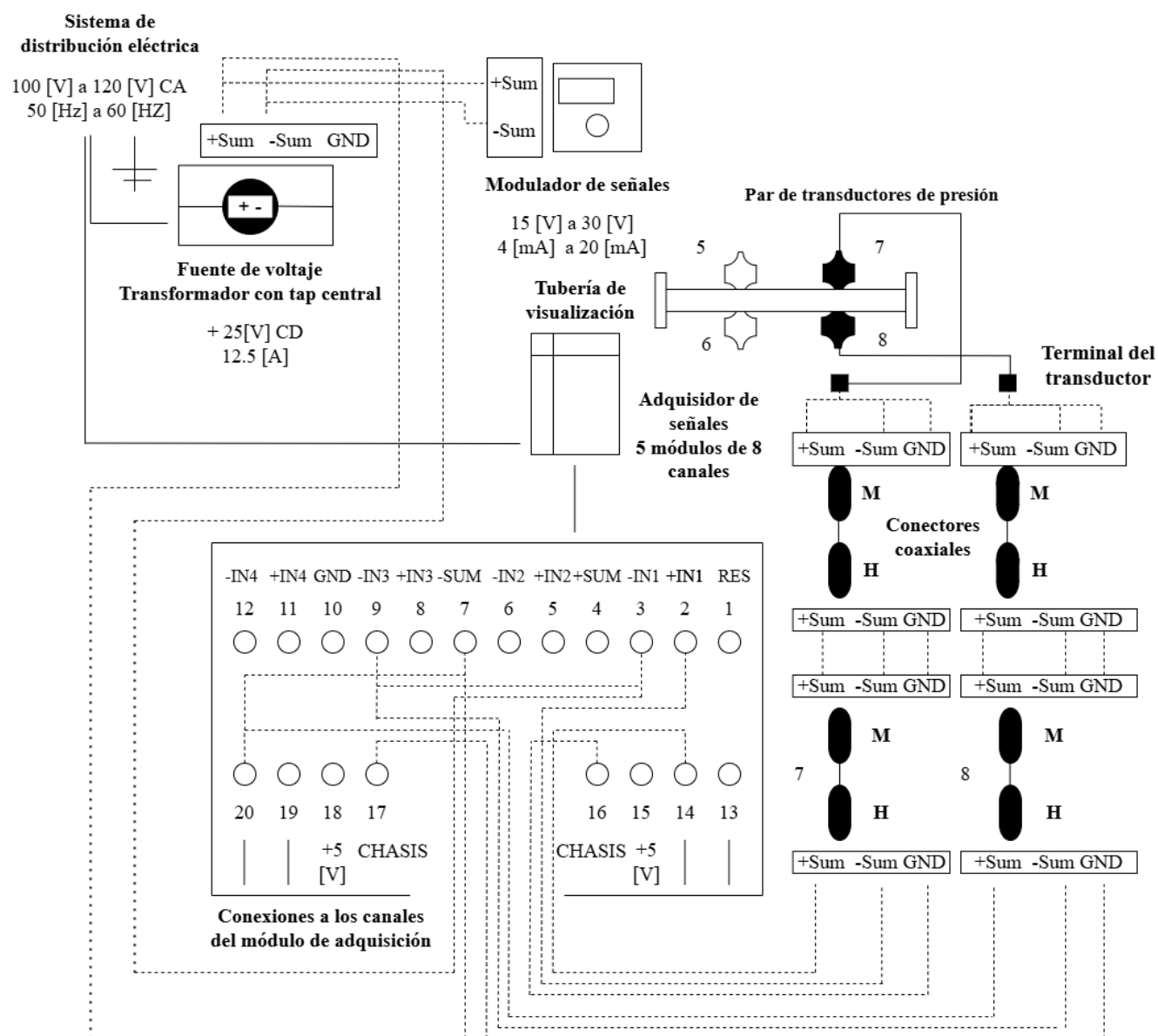


Figura 4.3. Diagrama de proceso: instalación de transductores de presión.

En suma, la ruta de trabajo para la instalación de los transductores de presión se muestra en el siguiente diagrama de flujo:

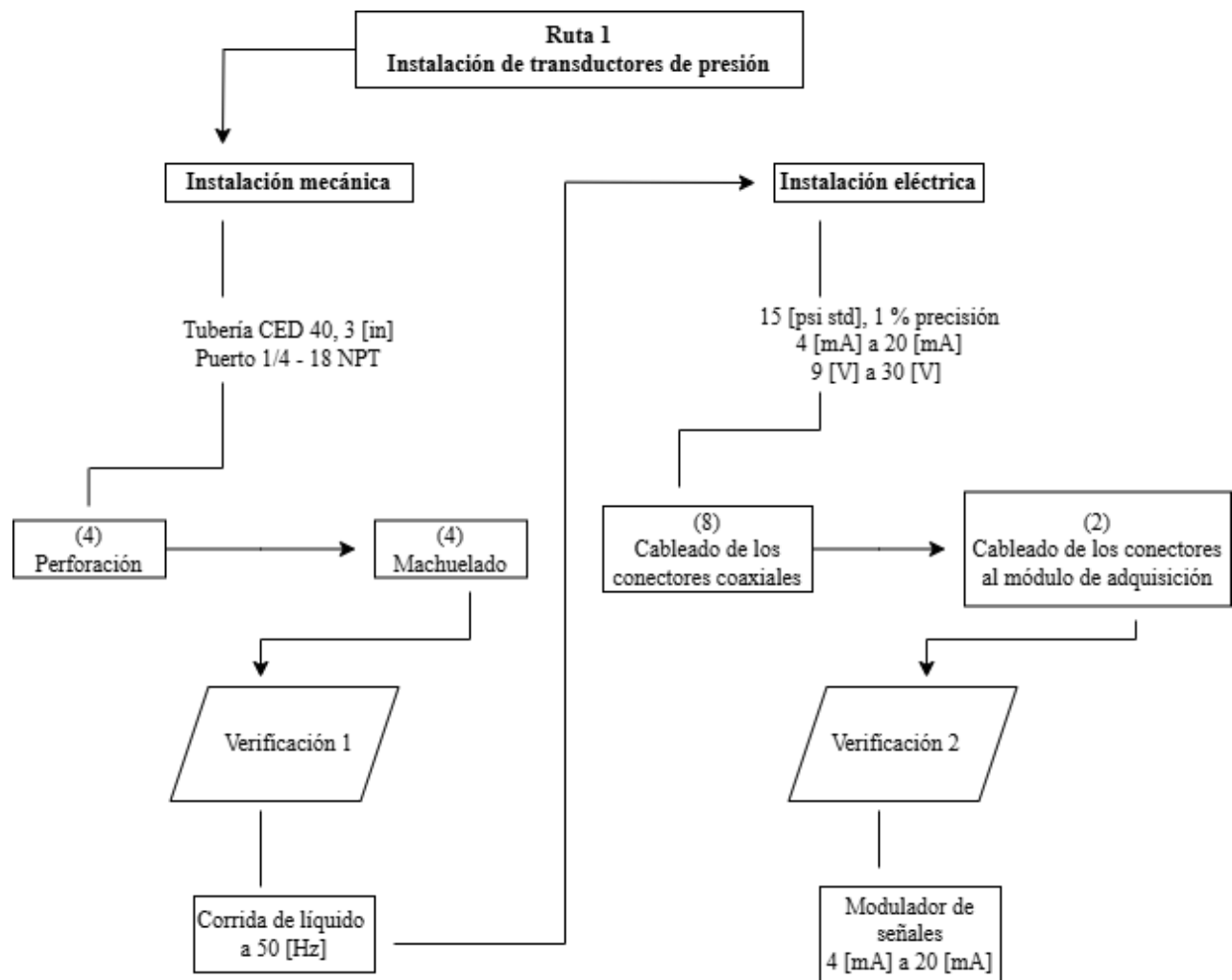


Figura 4.4. Ruta de trabajo para la instalación de transductores de presión.

4.4. VELOCIDAD LOCAL DE TAPONES EN EL FLUJO BIFÁSICO LÍQUIDO-GAS: CAMPAÑA EXPERIMENTAL Y ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE PRESIÓN

Ya que se verifican ambas instalaciones, el siguiente paso en la obtención de señales para cuantificar la velocidad local de tapones en el patrón de flujo intermitente es la organización de la campaña experimental. Donde la adquisición final de archivos en formato “.csv” con los registros de presión se da en función de la siguiente configuración al software IMC Studio:

Tiempo de adquisición/experimento	300 [s] = 5 [min]
Frecuencia de adquisición	$f_{\text{adquisición}} = 10 \left[\frac{1}{\text{s}} \right]$
Periodo de adquisición	$T_{\text{adquisición}} = \frac{1}{f_{\text{adquisición}}} = 0.1 \text{ [s]}$
Datos registrados	$N = 3\,000 \left[\frac{\text{datos}}{\text{variable}} \right]$

Tabla 4.5. Configuración del adquirente de señales para los flujos másicos.

Tiempo de adquisición/experimento	300 [s] = 5 [min]
Frecuencia de adquisición	$f_{\text{adquisición}} = 50 \left[\frac{1}{\text{s}} \right]$
Periodo de adquisición	$T_{\text{adquisición}} = \frac{1}{f_{\text{adquisición}}} = 0.02 \text{ [s]}$
Datos registrados	$N = 15\,000 \left[\frac{\text{datos}}{\text{variable}} \right]$

Tabla 4.6. Configuración del adquirente de señales para las presiones P_5 , P_6 , P_7 , y P_8 en los transductores.

Así, la operación del circuito experimental con sus cinco subsistemas coordinados demanda la colaboración de cinco operadores (A, B, C, D, E), con la siguiente distribución:

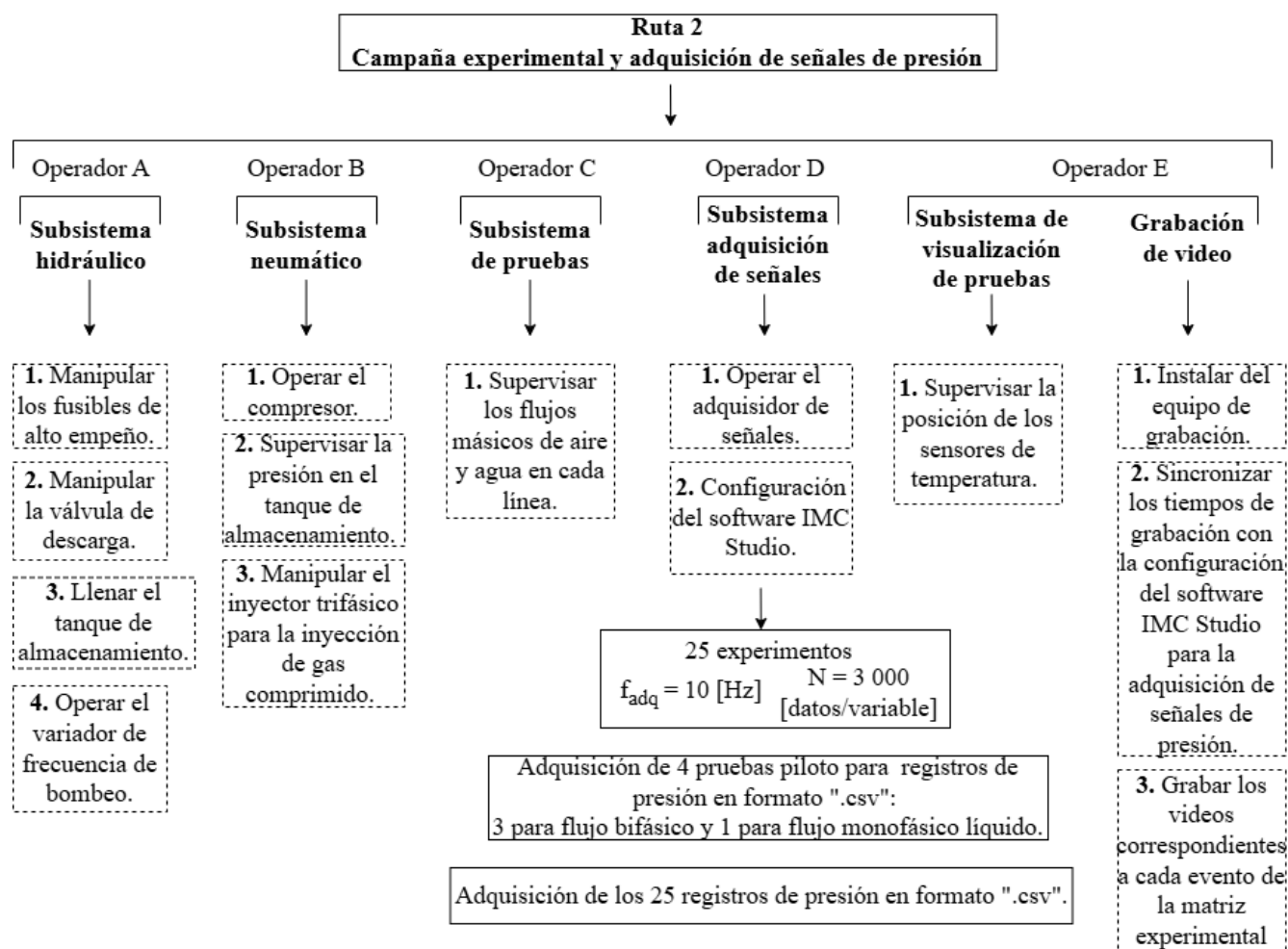


Figura 4.5. Ruta de trabajo para la organización de la campaña experimental.

AGUA-AIRE-EXP(#).CSV																exportación	AGUA-AIRE-EXP(#).XLS															
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z						
1	0.1	mass Air	0.1	mass Liq	0.1	P1	0.1	P2	0.1	P3	0.1	P4	0.1	P5	0.1	P6	0.1	P7	0.1	P8	0.1	T1	0.1	T2	0.1	Tamb						
2	0.2																															
3	0.3	5.47	0.3	5.03	0.3	3.29	0.3	2.07	0.3	1.75	0.3	0.49	0.3	0.37	0.3	0.36	0.3	0.50	0.3	0.39	0.3	21.28	0.3	21.66	0.3	25.03						
4	0.4	5.43	0.4	5.05	0.4	3.27	0.4	2.08	0.4	1.70	0.4	0.49	0.4	0.37	0.4	0.36	0.4	0.50	0.4	0.39	0.4	21.28	0.4	21.66	0.4	25.03						
5	0.5	5.45	0.5	5.04	0.5	3.24	0.5	2.03	0.5	1.75	0.5	0.49	0.5	0.37	0.5	0.36	0.5	0.50	0.5	0.40	0.5	21.28	0.5	21.66	0.5	25.03						
...	...		...		...		...		...		...		...		...		...		...		...		...		...							
3002	300	5.98	300	5.04	300	3.31	300	2.12	300	1.82	300	0.52	300	0.38	300	0.38	300	0.53	300	0.42	300	21.37	300	21.75	300	25.07						

Figura 4.6. Subsistema de adquisición de señales: ejemplo de visualización de archivos “.xls” con los registros de presión obtenidos en el módulo de adquisición.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES DE PRESIÓN

Con los registros disponibles se identifican apropiadamente las columnas de presión correspondientes a los transductores instalados, que resultan ser los asociados a las presiones: P_5, P_6, P_7 , y P_8 . Posteriormente se definen las variables de interés para realizar el análisis de las velocidades locales promedio de los tapones que se forman. Las cuales hacen referencia a los gradientes de presión en cada columna de los dos pares de transductores.

$$\text{Gradiente 1: } \Delta P_1 = P_6 - P_5 \quad (5.1)$$

$$\text{Gradiente 2: } \Delta P_2 = P_8 - P_7 \quad (5.2)$$

El método principal de cálculo para tal propósito hace las siguientes consideraciones. En primera instancia se grafican los gradientes de presión para visualizar la formación de los tapones. A estas señales determinísticas se les aplica un filtrado de ventana media móvil de primer orden para trabajar con curvas más suaves y de mejor visualización. Una vez que estas curvas se filtran, se derivan una vez a lo largo del tiempo y con ello se obtienen las posiciones de los máximos locales que se identifican en las gráficas. Posteriormente, se toman únicamente los máximos locales que se asocian a los tapones. Visualmente esto es una cresta de formación en un rango de presiones delimitado. Para finalmente obtener los instantes de tiempos asociados a esos máximos locales y con ello los intervalos de tiempo que tardan los tapones en recorrer un metro de distancia, que es la separación entre los transductores de presión instalados en la tubería de visualización. Ver expresión 5.3 e imágenes 5.1 y 5.2.

$$u_{lt} = \frac{1 \text{ [m]}}{\Delta t} \quad (5.3)$$

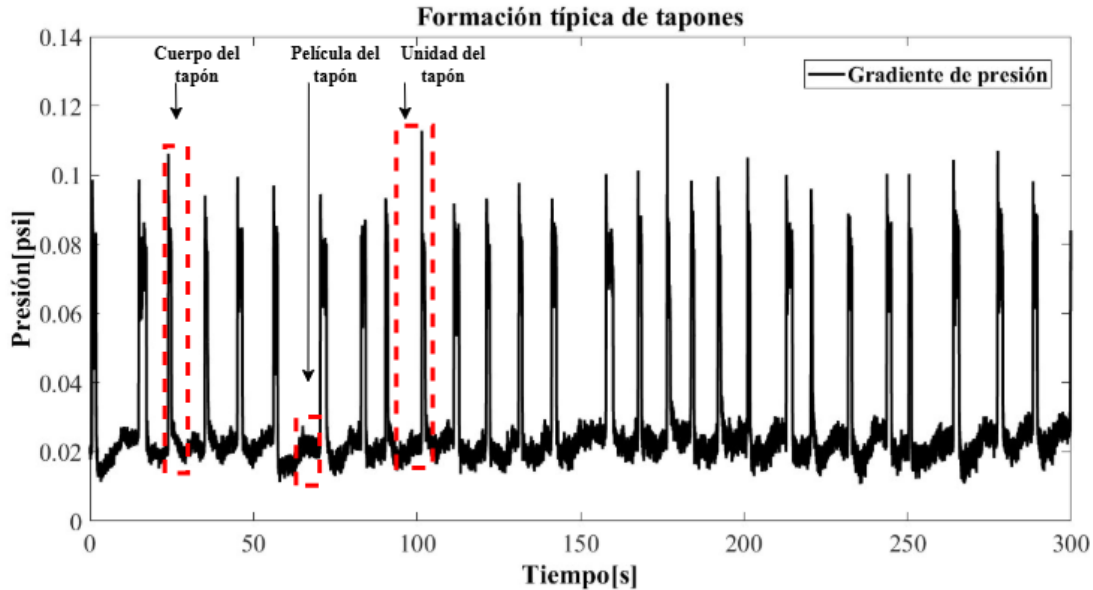


Figura 5.1. Formación típica de tapones en flujo horizontal de baja viscosidad.

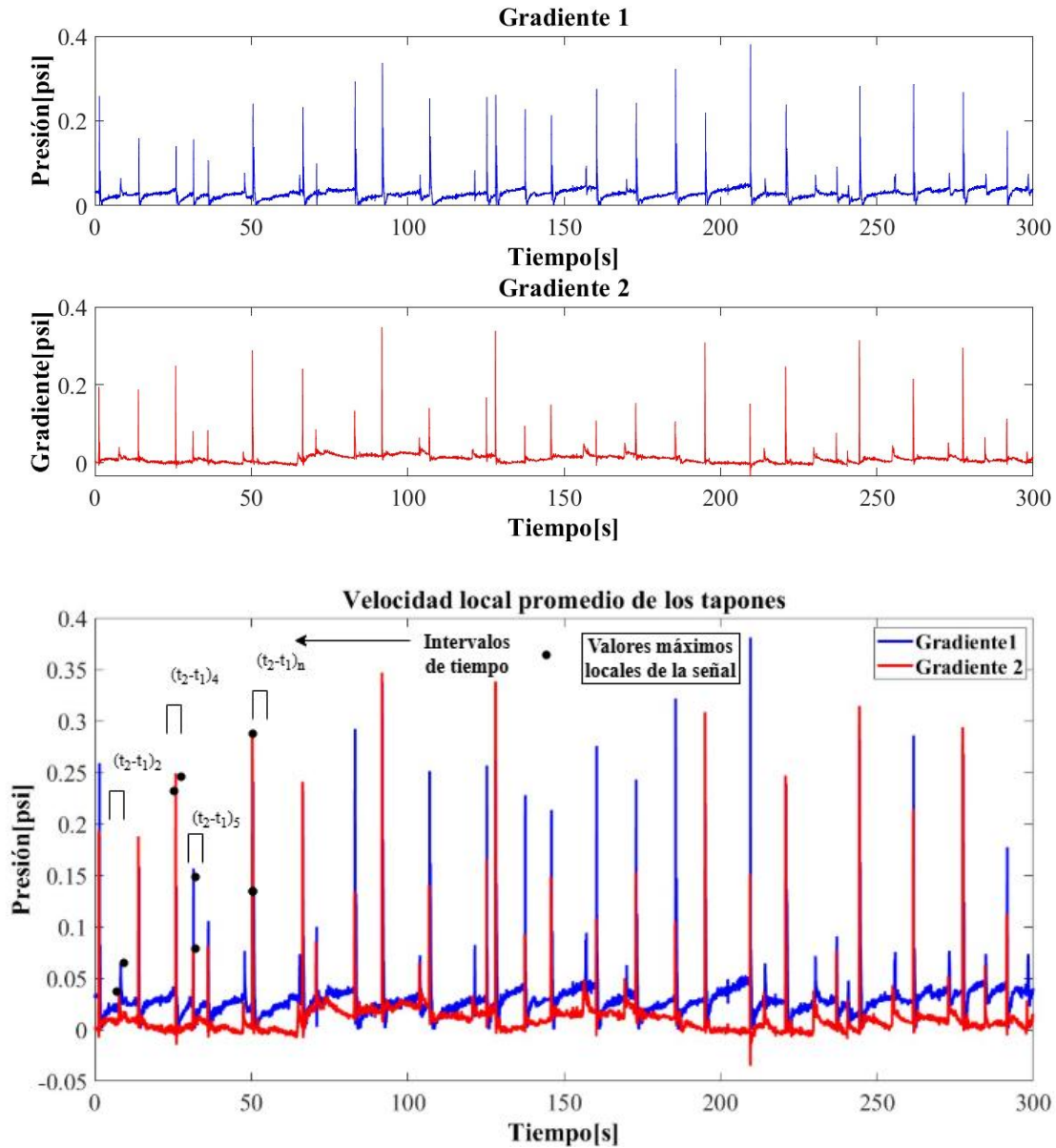


Figura 5.2. Estimación de intervalos de tiempo entre gradientes de presión.

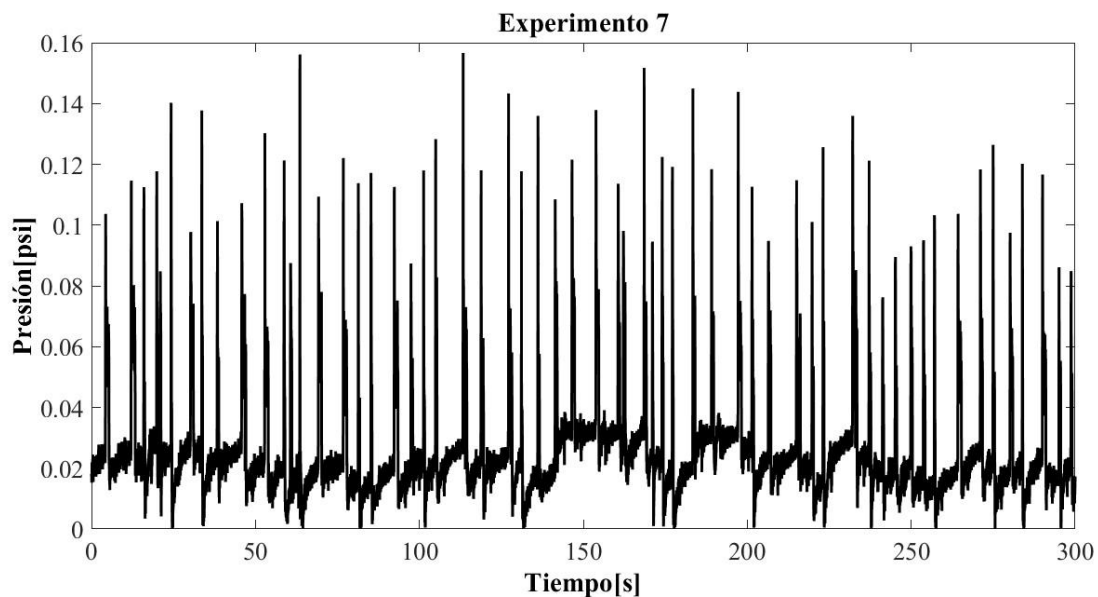
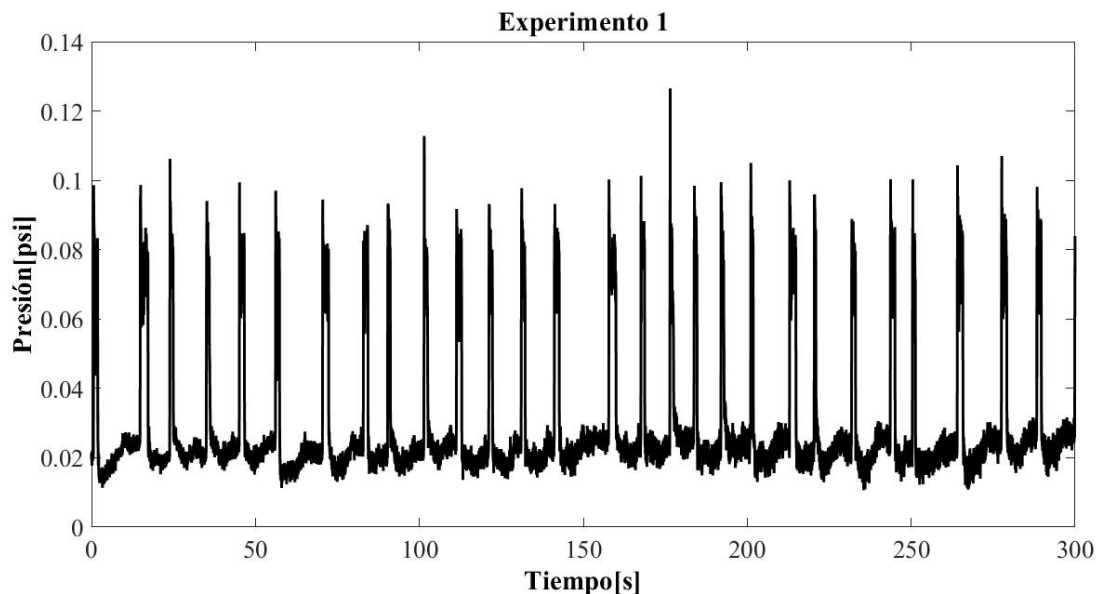
Una vez que se determinan los intervalos de tiempo de los tapones¹⁷ y en consecuencia las velocidades¹⁸ locales de esos tapones, se filtran estos valores con las siguientes condiciones de frontera: la velocidad superficial de la mezcla establece el límite de velocidad de los tapones, los tapones de cada experimento comparten una amplitud de presión característica, la cual se declara por experimento en el siguiente capítulo, y el cálculo se da con las señales empatadas de acuerdo

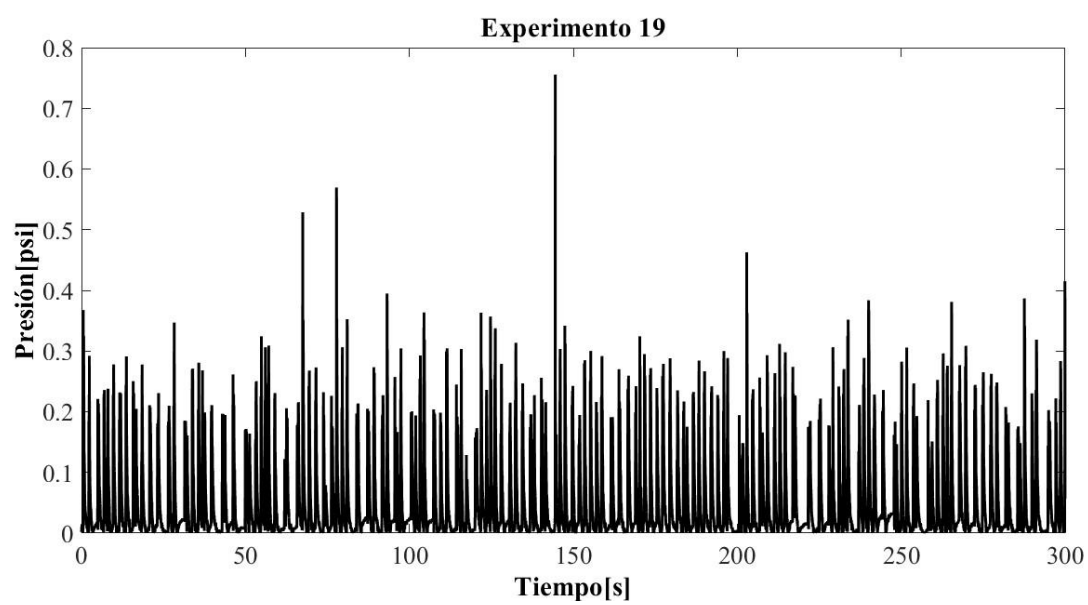
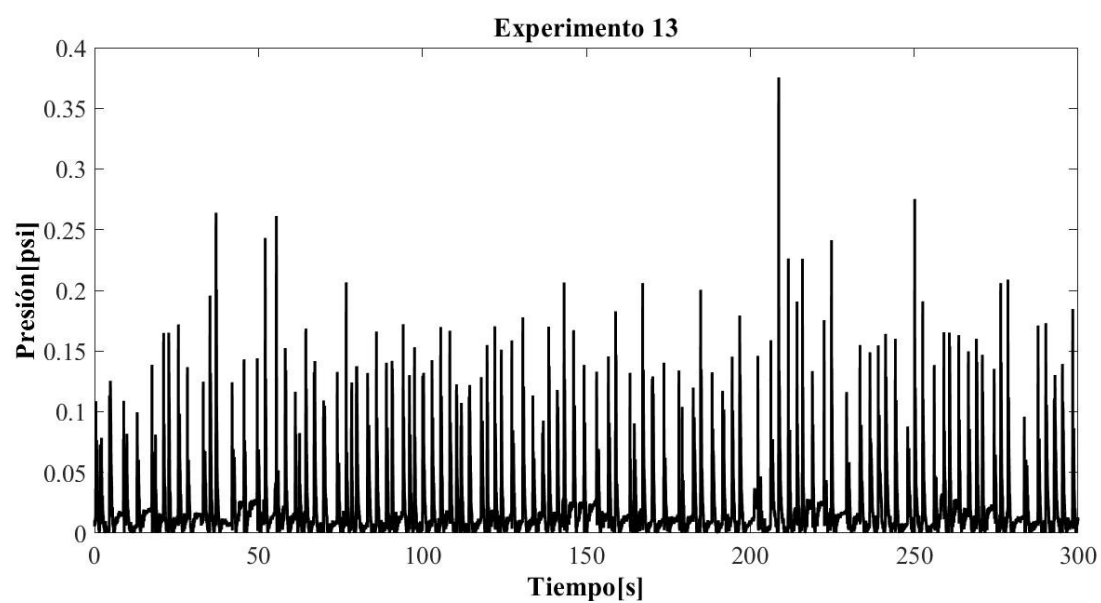
¹⁷ En este documento al referirse de tapones se habla sobre unidades de tapones. Ambos términos se emplean indistintamente.

¹⁸ Las velocidades locales promedio de los tapones (u_{lt}) corresponden a las velocidades locales promedio de las unidades de tapón, que como se puntualiza en la figura 5.1, hacen énfasis en los cuerpos de los tapones y las películas de los tapones asociadas.

con la secuencia de adquisición que se expuso en el capítulo 4. De manera puntual, con estas condiciones se restringen zonas del flujo que no se pretenden analizar, es decir, se busca estudiar la unidad del tapón, siendo este quien represente la obstrucción al área de sección transversal en la tubería. Por ello, con estas acotaciones se aísla en mayor porción a los fenómenos que pudieran contaminar el experimento, como vibraciones mecánicas o interferencias a la señal de adquisición.

Entonces, los gráficos que corresponden a los primeros gradientes de las presiones y el filtrado de estos se muestran a continuación. Exponiendo los eventos de la diagonal principal de la matriz experimental que se mostró en el capítulo 4. Por su parte, el análisis y discusión de estos resultados se expone a detalle en los siguientes capítulos.





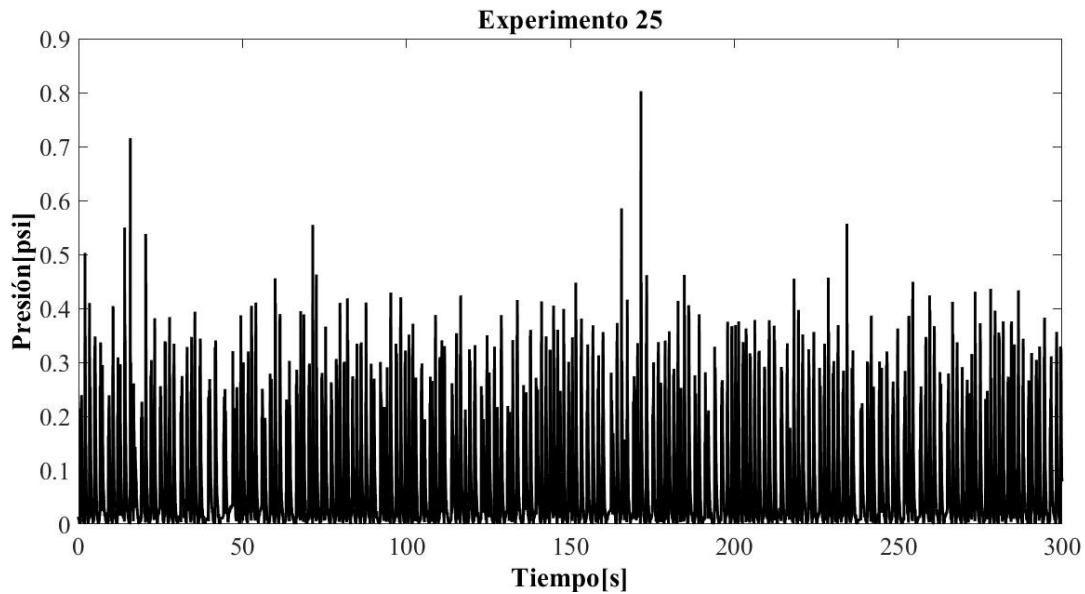
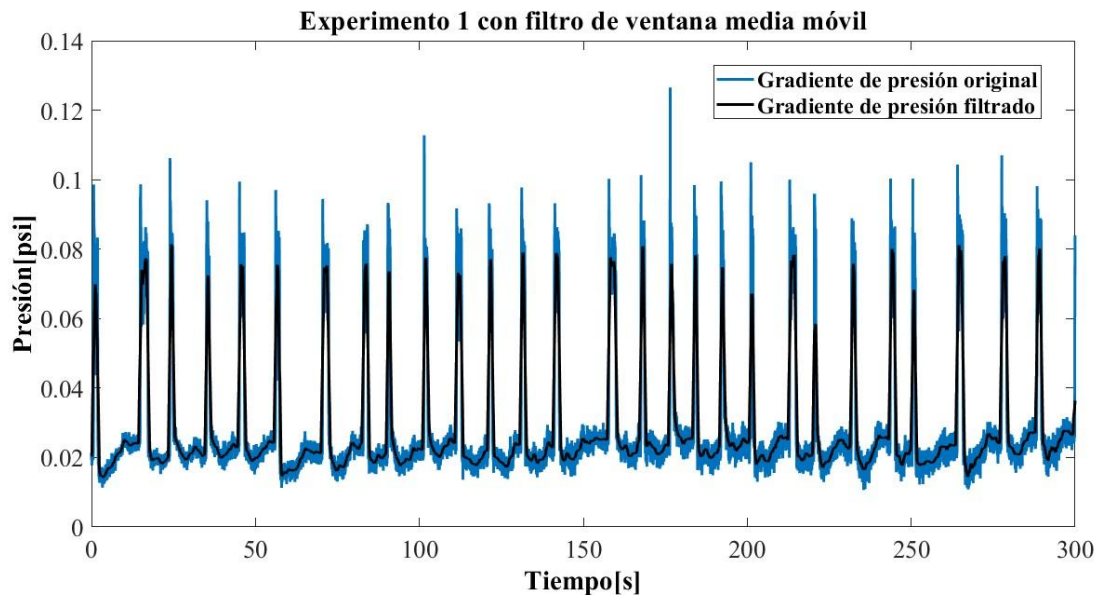
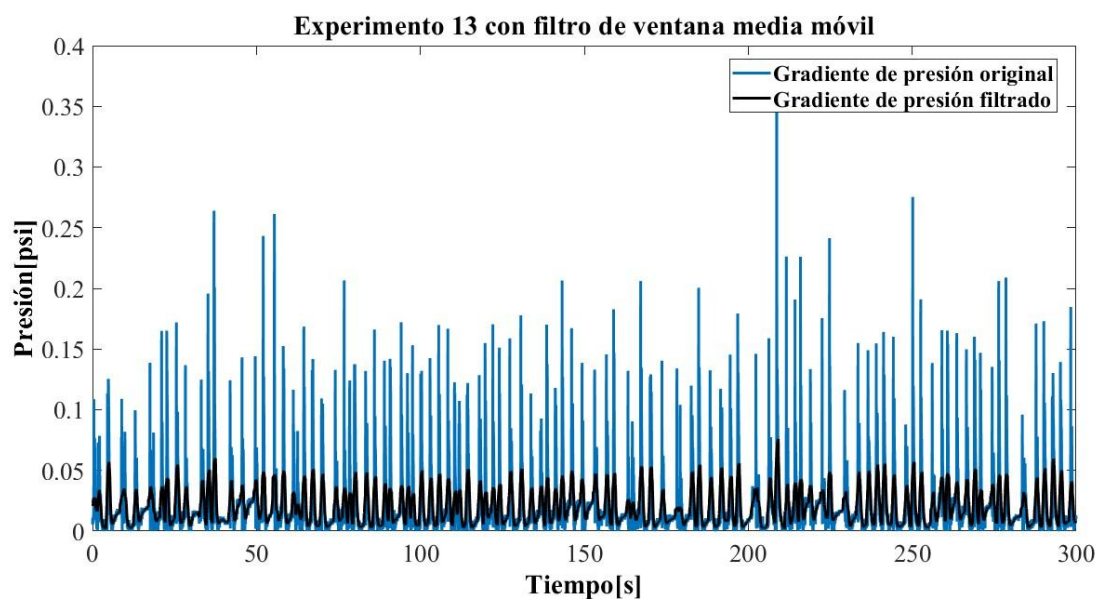
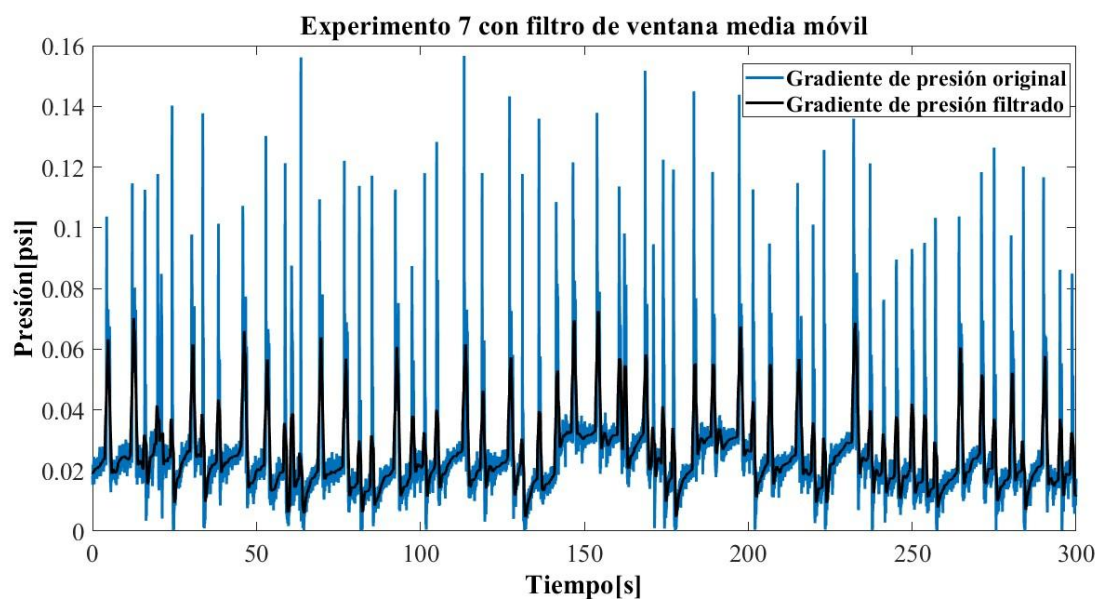


Figura 5.3. Gradientes de presión de la diagonal principal.

5.2. SUAVIZADO DE LAS SEÑALES DE PRESIÓN CON FILTRO DE VENTANA MEDIA MÓVIL

Con la visualización de los gradientes de presión en la sección anterior, es notorio para algunas secciones en el tiempo que la adquisición presenta ruidos internamente. Gráficamente estos ruidos que generan contaminación, son los picos excedentes de la amplitud media en toda la señal. Para su mitigación es conveniente implementar un filtro y facilitar la ubicación de las tendencias de formación de tapones. En este caso, el filtro es un ventaneo móvil de primer orden como se muestra enseguida:





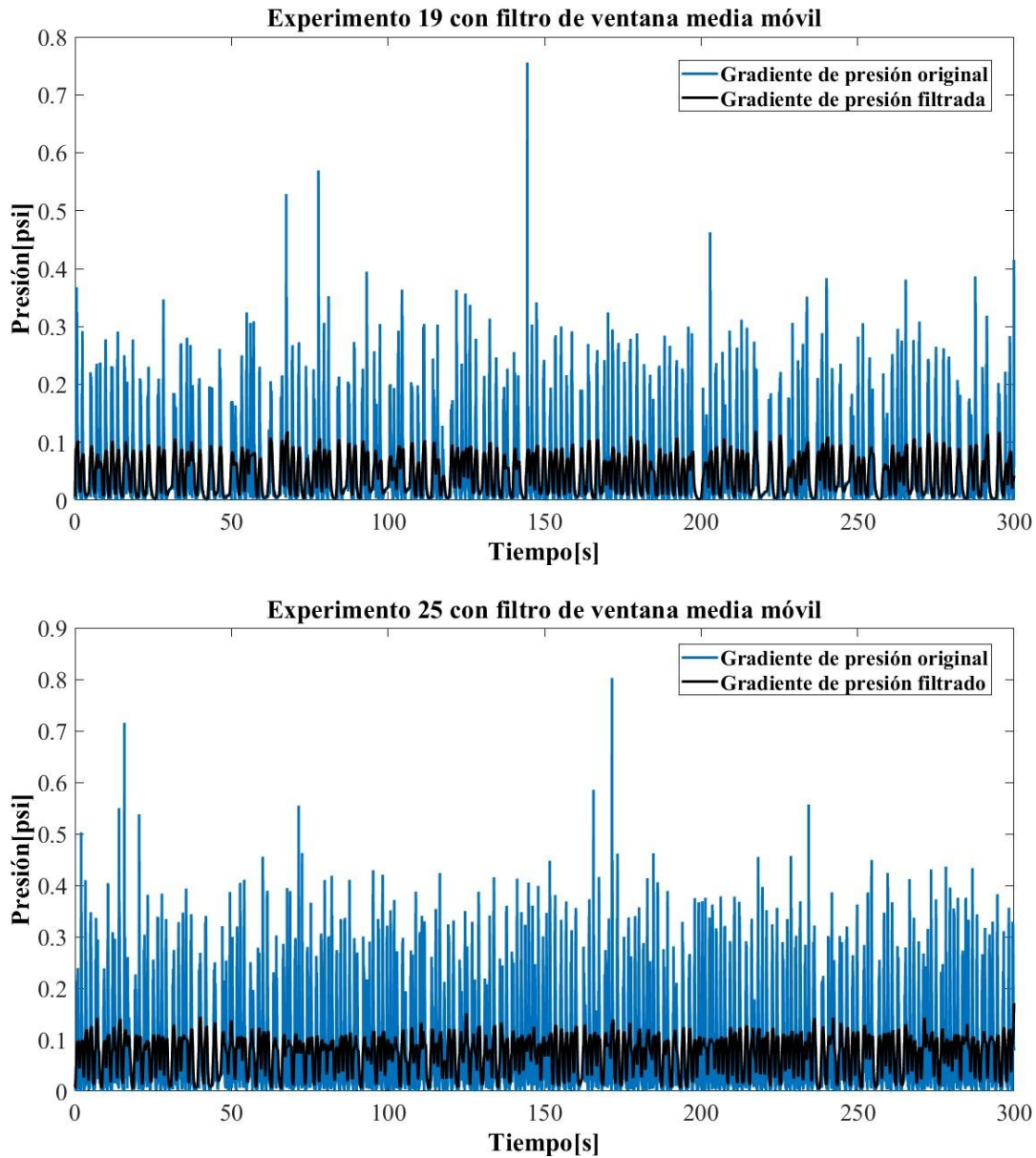
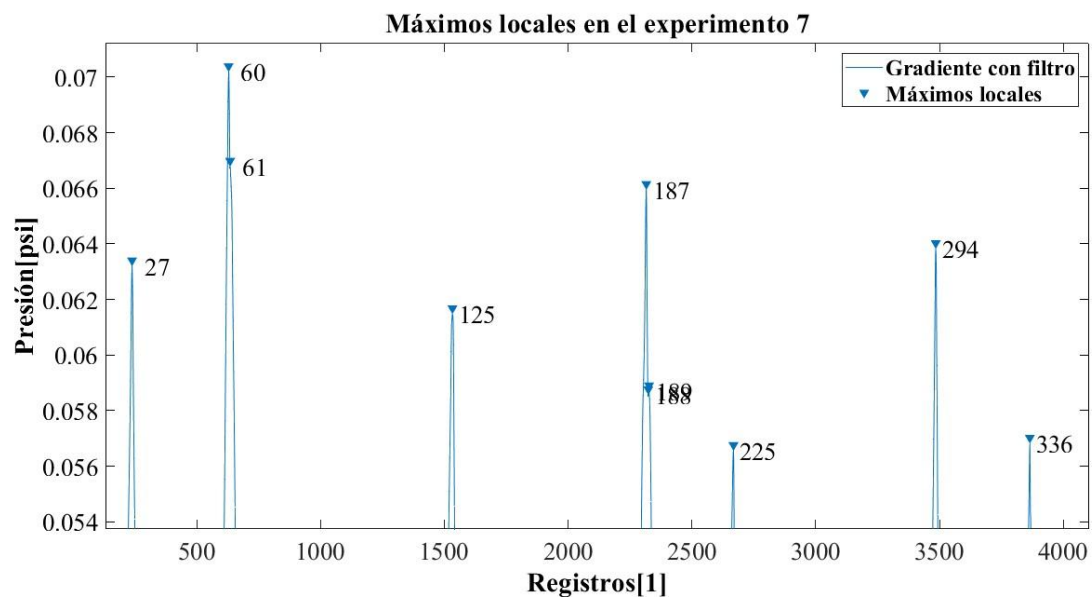
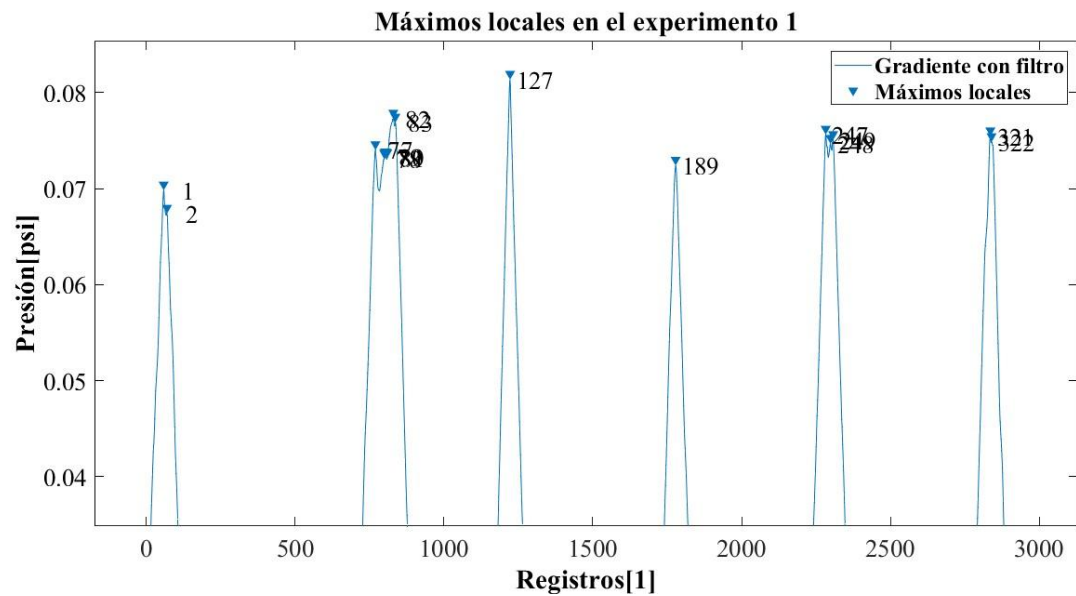
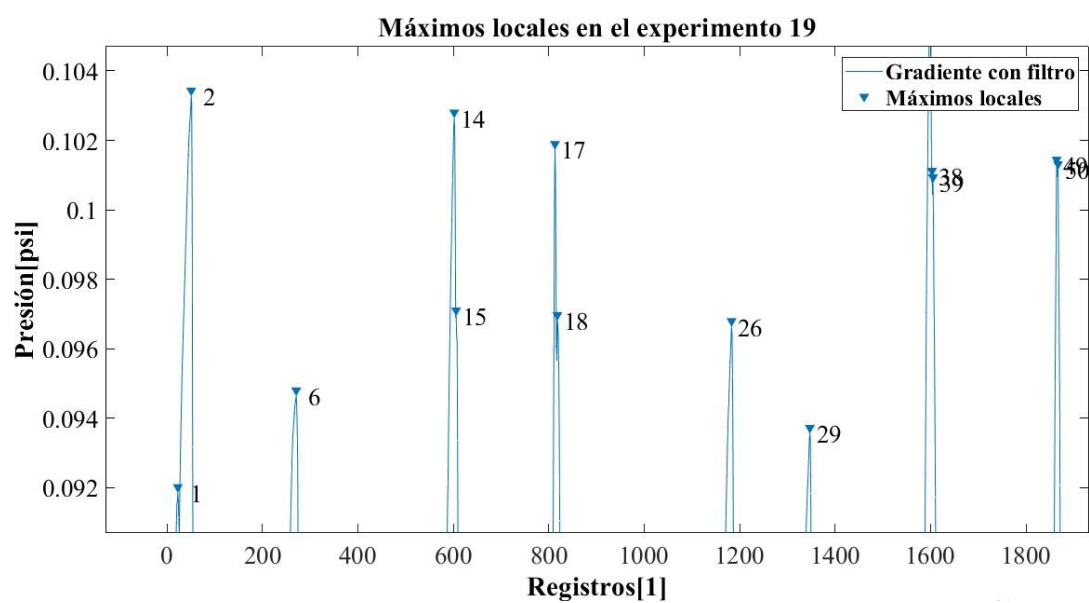
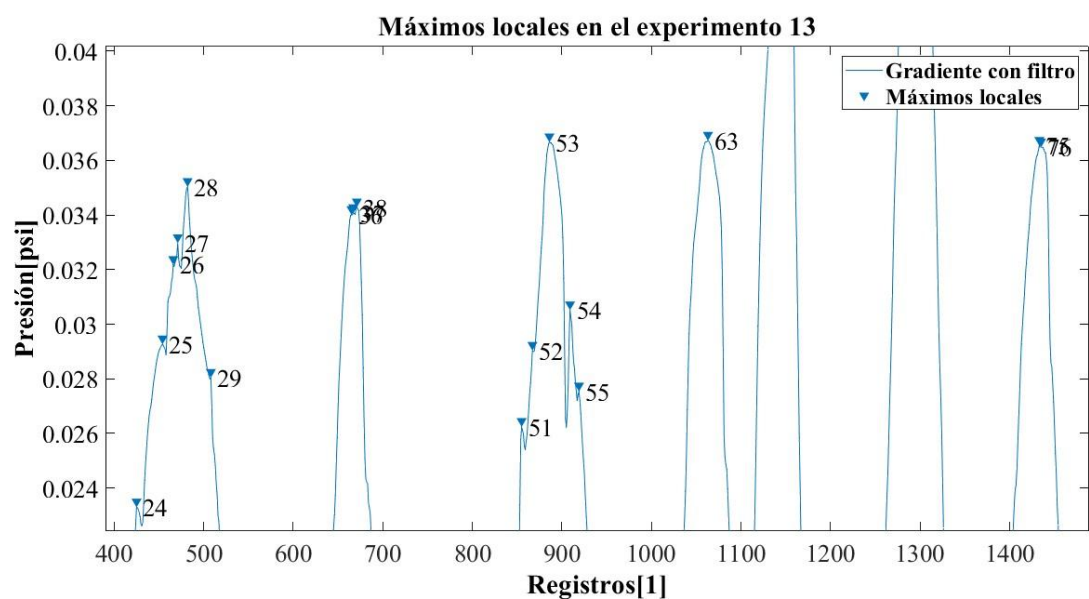


Figura 5.4. Filtrado de los gradientes de presión de la diagonal principal.

5.3. CRITERIO DE LA PRIMERA DERIVADA DE SEÑALES DE PRESIÓN

En este método se derivan las señales filtradas para visualizar los máximos locales y numerarlos de acuerdo con su aparición. Estos tienen lugar en el conjunto de los quince mil datos adquiridos por experimento a una tasa de muestreo de 50 [Hz] durante 300 [s]. Únicamente se toman los datos correspondientes a la formación de los tapones, cuya etiqueta tiene asociado un instante en el tiempo. Este proceso se repite para ambos gradientes de presión, comparando todos los tiempos de tapones y promediando las velocidades locales.





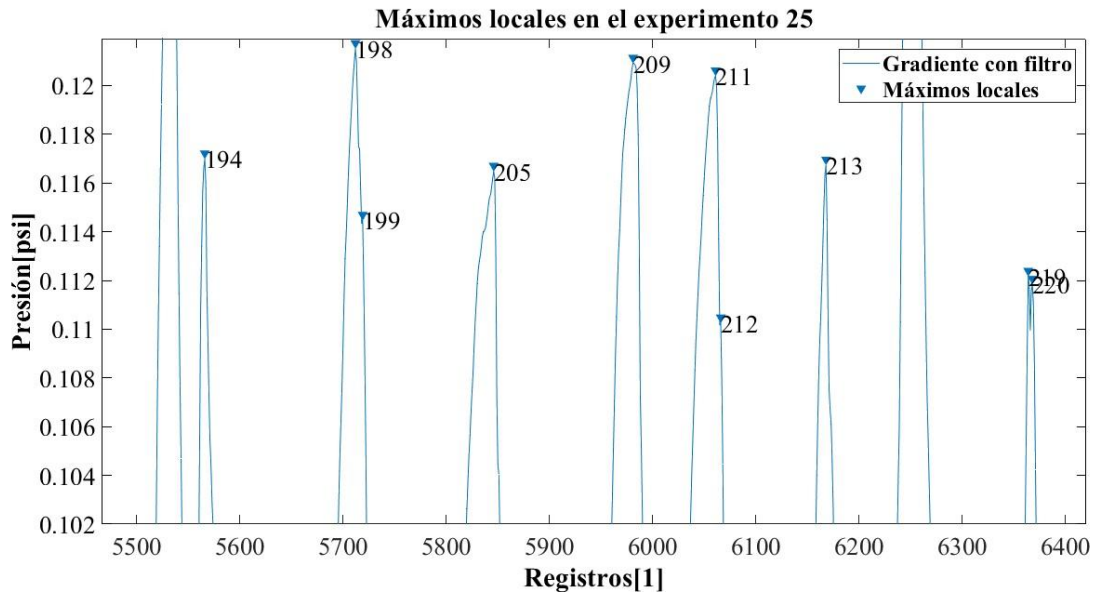


Figura 5.5. Máximos locales de los gradientes de presión en la diagonal principal.

Como se vio en la figura 5.3, se proyecta la diferencia de presiones de la columna de flujo en el tiempo de adquisición para cada experimento, mientras que en la figura 5.4 se visualiza el filtrado de esa diferencia de presiones, y en la figura 5.5 se posicionan los mismos registros de cada experimento de presión en la tubería, estos se indican en un intervalo dentro de los quince mil registros, etiquetando los valores máximos locales de la señal, estos máximos locales representan marcas en el tiempo para la estimación de la diferencia de tiempo entre transductores.

Los resultados que arroja este método de estimación no invasivo para la velocidad local promedio de los tapones se resumen en la siguiente tabla. Donde se comparan estos valores con los de la velocidad superficial de la mezcla bifásica líquido-gas. Que como se indica en la primera sección de este capítulo, se sabe que la velocidad local de los tapones es superior a la velocidad superficial de la fase líquida total, pero inferior a la velocidad superficial de la mezcla bifásica.

	$u_{sm} \left[\frac{m}{s} \right]$	$u_{lt} \left[\frac{m}{s} \right]$	Porcentaje de similitud [%]
1	1.81	1.23	67.95
2	2.82	1.79	63.47
3	4.07	1.15	28.25
4	5.36	2.09	38.99
5	6.16	2.40	38.96
6	2.01	1.71	85.07
7	2.92	1.37	46.91
8	4.01	2.10	52.36
9	5.23	2.18	41.68
10	6.16	2.40	38.96
11	2.20	0.99	45.00
12	3.04	2.18	71.71
13	4.01	1.67	41.64
14	5.19	1.52	29.28
15	5.72	1.26	22.02
16	2.38	1.02	42.85
17	3.18	1.30	40.88
18	4.17	1.34	32.13
19	5.06	1.69	33.39
20	5.59	1.39	24.86
21	2.54	1.66	65.35
22	3.24	1.94	59.87
23	4.08	2.16	52.94
14	5.01	1.70	33.93
25	5.52	1.94	35.14

Tabla 5.1. Velocidad local de tapones mediante el cálculo de la primera derivada.

5.4. FRECUENCIA ASOCIADA A LA FORMACIÓN DE LOS TAPONES

Por lo que respecta a la formación de los tapones y la frecuencia de estos, se elabora el conteo de estos tapones en las gráficas experimentales de los gradientes de presión que se mostraron anteriormente en la figura 5.3. Estos tapones se contabilizan para los 300 [s] que dura la adquisición de las señales en cada experimental. Obteniendo como resultado los siguientes valores:

	Tapones [1]	f_t [Hz]
1	28	0.093
2	31	0.103
3	23	0.077
4	30	0.1
5	42	0.14
6	77	0.257
7	58	0.193
8	54	0.18
9	61	0.203
10	42	0.14
11	146	0.487
12	116	0.387
13	106	0.353
14	95	0.317
15	108	0.36
16	230	0.767
17	188	0.627
18	159	0.53
19	152	0.507
20	151	0.503
21	312	1.04
22	225	0.75
23	216	0.72
24	204	0.68
25	213	0.71

Tabla 5.2. Contabilización de tapones y estimación de su frecuencia mediante las gráficas de presión.

Con la estimación de la velocidad local promedio de los tapones y el conteo de los tapones con la frecuencia de formación asociada. Se muestra la siguiente tabla condensada con los valores de las secciones expuestas en este capítulo. Que se complementa con el método de validación para el conteo de la formación de los tapones. Este método consiste en una campaña de videograbación de cuatro sesiones con diferentes tiempos de duración. Una vez que se tienen los videos se establecen intervalos de confianza al noventa por ciento de precisión para su estimación estadística. Ver tabla 5.3.

	Sesión 1 120 [s]		Sesión 2 120 [s]		Sesión 3 120 [s]		Sesión 4 60 [s]	
	Tapones [1]	Frecuencia [Hz]	Tapones [1]	Frecuencia [Hz]	Tapones [1]	Frecuencia [Hz]	Tapones [1]	Frecuencia [Hz]
1	11	0.92	12	0.10	11	0.09	5	0.08
2	9	0.07	11	0.09	12	0.10	6	0.10
3	10	0.08	8	0.06	8	0.06	5	0.08
4	12	0.10	8	0.06	9	0.07	8	0.13
5	18	0.15	15	0.12	13	0.11	12	0.20
6	29	0.24	34	0.28	29	0.24	15	0.25
7	23	0.19	24	0.20	26	0.21	13	0.21
8	20	0.16	24	0.20	25	0.21	13	0.21
9	30	0.25	21	0.17	22	0.18	15	0.25
10	32	0.26	30	0.25	30	0.25	15	0.25
11	57	0.47	59	0.49	59	0.49	29	0.48
12	48	0.40	44	0.37	46	0.38	24	0.40
13	44	0.37	42	0.35	38	0.32	20	0.33
14	43	0.35	38	0.32	37	0.31	22	0.37
15	45	0.37	47	0.39	44	0.37	23	0.38
16	89	0.74	92	0.77	97	0.81	49	0.82
17	73	0.61	70	0.58	98	0.82	34	0.57
18	63	0.52	68	0.57	65	0.54	34	0.57
19	61	0.51	62	0.52	62	0.52	33	0.55
20	68	0.57	61	0.51	65	0.54	29	0.48
21	129	1.07	134	1.11	128	1.06	60	1.00
22	101	0.80	75	0.62	95	0.79	46	0.77
23	86	0.72	95	0.79	88	0.73	43	0.72
24	88	0.73	81	0.67	82	0.68	38	0.63
25	80	0.67	88	0.73	83	0.69	43	0.72

Tabla 5.3. Campaña de videograbación de los tapones.

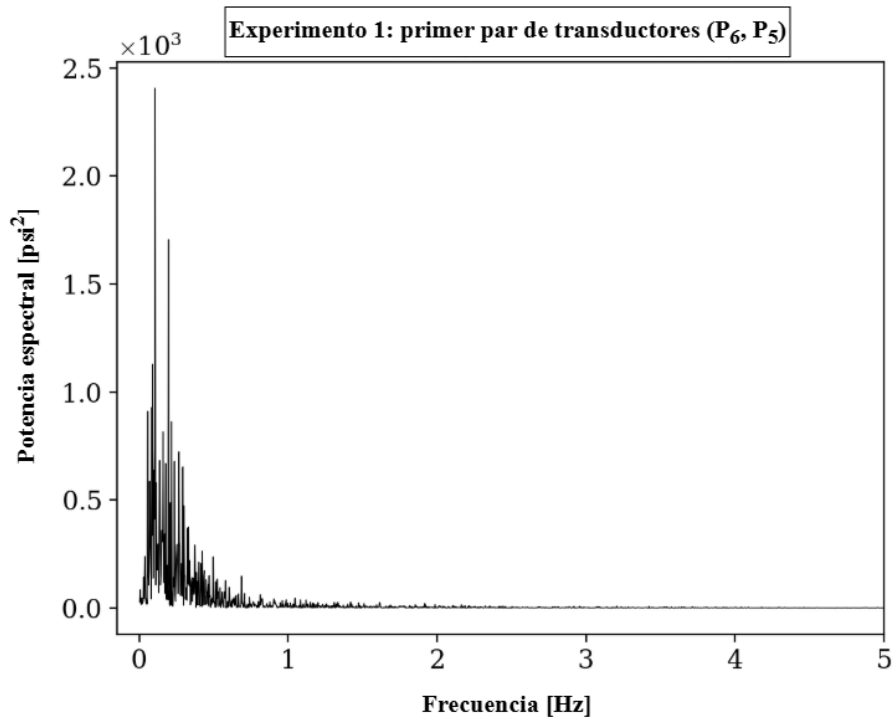
	Velocidades superficiales $\left[\frac{m}{s}\right]$			Grabaciones		Experimental		Primera derivada
	u_{sg}	u_{sl}	u_{sm}	Tapones [1]	f_t [Hz]	Tapones [1]	f_t [Hz]	$u_{lt} \left[\frac{m}{s}\right]$
1	1.57	0.24	1.81	27.50	0.09	28	0.09	1.23
2	2.58	0.24	2.82	27.50	0.09	31	0.10	1.79
3	3.75	0.32	4.07	22.50	0.07	23	0.07	1.15
4	5.12	0.24	5.36	28.10	0.09	30	0.10	2.09
5	5.92	0.23	6.16	43.80	0.14	42	0.14	2.40
6	1.53	0.47	2.01	76.30	0.25	77	0.25	1.71
7	2.44	0.47	2.92	61.90	0.20	58	0.19	1.37
8	3.54	0.47	4.01	59.40	0.19	54	0.18	2.10
9	4.75	0.47	5.23	64.40	0.21	61	0.20	2.18
10	5.92	0.23	6.16	76.30	0.25	42	0.14	2.40
11	1.48	0.71	2.2	145.60	0.48	146	0.48	0.99
12	2.33	0.71	3.04	116.30	0.38	116	0.38	2.18
13	3.31	0.70	4.01	102.50	0.34	106	0.35	1.67
14	4.48	0.71	5.19	101.30	0.33	95	0.31	1.52
15	5.00	0.71	5.72	113.80	0.37	108	0.36	1.26
16	1.43	0.95	2.38	235.00	0.78	230	0.76	1.02
17	2.23	0.95	3.18	193.10	0.64	188	0.62	1.30
18	3.22	0.95	4.17	165.00	0.55	159	0.53	1.34
19	4.11	0.95	5.06	156.90	0.52	152	0.50	1.69
20	4.63	0.95	5.59	157.50	0.52	151	0.50	1.40
21	1.35	1.18	2.54	319.40	1.06	312	1.04	1.66
22	2.14	1.10	3.24	226.90	0.75	225	0.75	1.94
23	2.89	1.19	4.08	221.90	0.74	216	0.72	2.16
24	3.83	1.18	5.01	204.40	0.68	204	0.68	1.70
25	4.33	1.18	5.52	210.60	0.70	213	0.71	1.50

Tabla 5.4. Aproximación a la velocidad local de tapones.

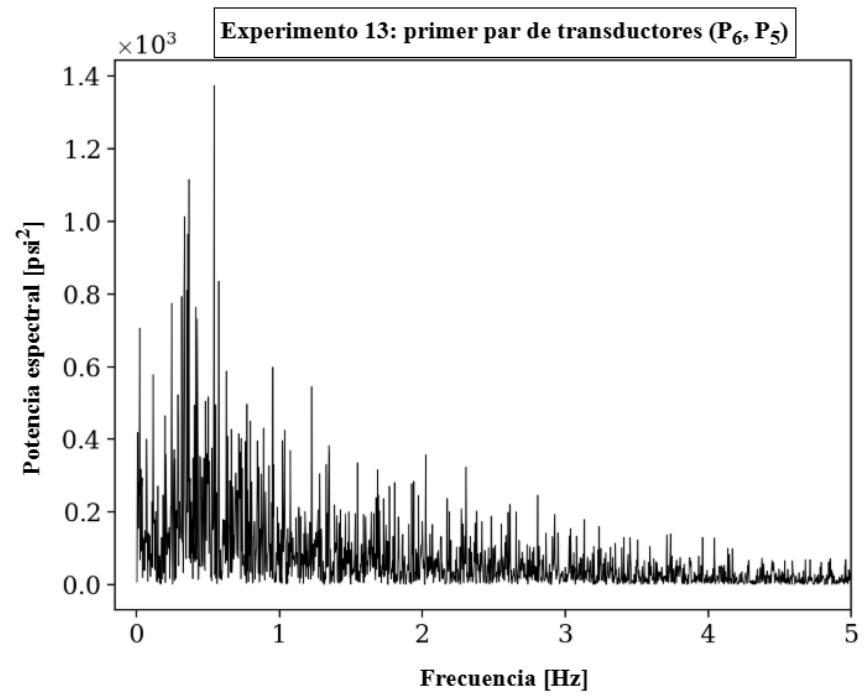
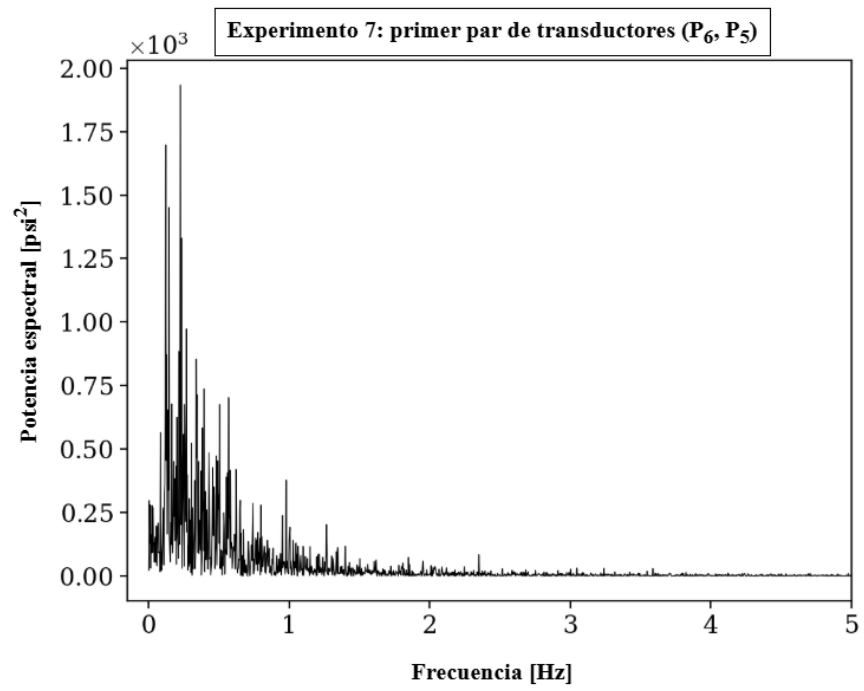
Las velocidades de mezcla más altas tuvieron lugar en el bloque 1 (experimentos 1 a 5), esto como se ve en la tabla 5.4 corresponde a las aportaciones más altas de inyección de gasto másico de gas, relacionado directamente con su velocidad superficial y la velocidad local promedio de los tapones que se formaron en esa etapa de la campaña experimental.

5.5. DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA DE LAS SEÑALES DE PRESIÓN

En esta sección del capítulo se analiza la huella espectral de cada uno de los experimentos de la campaña. Con ese fin de procesamiento digital de las señales, la herramienta más conveniente es la Transformada de Fourier¹⁹ (FT, por sus siglas en inglés). Esta despliega los componentes de las frecuencia de los valores adquiridos en un periodograma, donde se proyectan las distribuciones de energía correspondientes. En conjunto, este análisis lleva por nombre densidad espectral de potencia.



¹⁹ El lenguaje de programación Matrix Laboratory (MATLAB), para realizar el cálculo de la distribución energética en el dominio de la frecuencia, opera internamente con la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés).



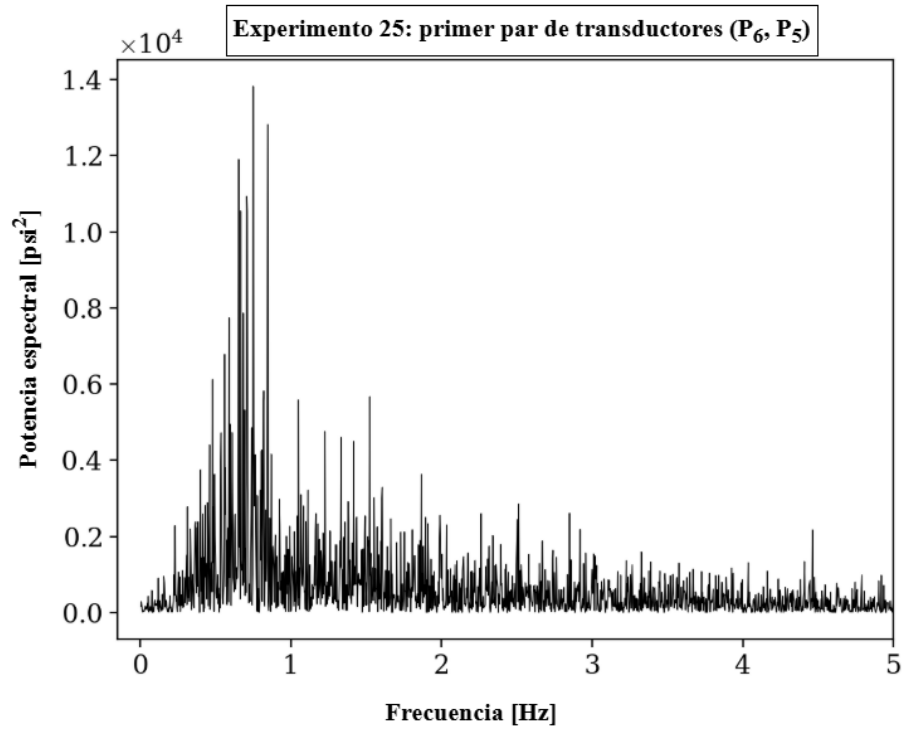
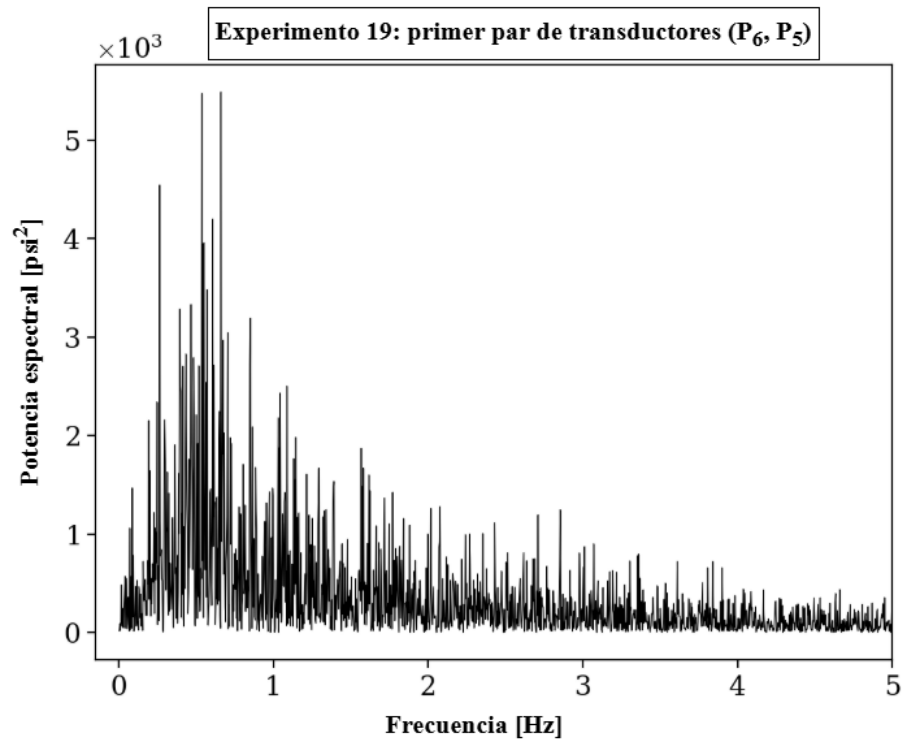


Figura 5.6. Espectros los primeros gradientes de presión en la diagonal principal de la matriz experimental.

Resalta que con la frecuencia de adquisición de 50 [Hz], se tiene el principal aporte energético en la banda de $0 \text{ [Hz]} \leq f \leq 5 \text{ [Hz]}$, exactamente en la banda de $0 \text{ [Hz]} \leq f \leq 2 \text{ [Hz]}$, que como se ve en la tabla 5.5, estos valores en incremento desde 0.1 [Hz] hasta 0.7 [Hz] se relacionan con las frecuencias asociadas a la formación de tapones en las mezclas bifásicas que se configuraron en la matriz experimental del capítulo 4.

En definitiva, se tiene un incremento en la densidad espectral de potencia asociada al transporte de mayores caudales de líquido en el sistema de tuberías. Es decir, para valores de gastos máscicos de $\dot{m}_l = 1 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ se tiene una potencia espectral de 2 400 [psi²], en tanto que para gastos de $\dot{m}_l = 5 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$, la potencia espectral asciende hasta 14 000 [psi²].

Experimento	Primer par de transductores Frecuencia dominante [Hz]	Segundo par de transductores Frecuencia dominante [Hz]	Frecuencia experimental de formación de tapones f_t [Hz]
1	0.1066	0.1066	0.093
2	0.0066	0.0033	0.103
3	0.0066	0.0033	0.077
4	0.0366	0.0033	0.1
5	0.0233	0.01	0.14
6	0.2766	0.2766	0.257
7	0.1233	0.2266	0.193
8	0.0033	0.17	0.18
9	0.15	0.0133	0.203
10	0.0233	0.01	0.14
11	0.43	0.43	0.487
12	0.0166	0.43	0.387
13	0.5433	0.02	0.353
14	0.29	0.0433	0.317
15	0.4866	0.6733	0.36
16	0.59	0.59	0.767
17	0.0066	0.5266	0.627
18	0.6233	0.57	0.53
19	0.66	0.66	0.507
20	0.47	1.9966	0.503
21	0.0033	0.92	1.04
22	0.0033	0.6366	0.75
23	0.67	0.7166	0.72
24	0.7866	1.2466	0.68
25	0.75	0.75	0.71

Tabla 5.5. Frecuencias dominante con mayor aporte de potencia espectral.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. FRECUENCIA DE LOS TAPONES

En primera instancia se analiza la sección correspondiente a la frecuencia de formación de tapones. El lado izquierdo de la tabla 6.1 expone lo referente a la campaña de videograbación, en tanto que el lado derecho proyecta los resultados que se obtuvieron a partir de la observación de los tapones en las gráficas experimentales de los gradientes de presión. Esto manifiesta una comparación entre datos referenciales y experimentales. Para obtener los valores de referencia se analiza cada uno de los veinticinco experimentos de la matriz experimental, contrastándolos en las cuatro sesiones de la campaña de videograbación mediante la función de distribución de probabilidad t-student y la desviación estándar. Al final se promedian estos conjuntos, los cuales permiten visualizar los siguientes errores porcentuales para los tapones experimentales:

	Tapones referenciales [1]	Frecuencia referencial [Hz]	Tapones experimentales [1]	Frecuencia experimental [Hz]	Error porcentual [%]
1	27.5	0.092	28	0.093	1.09
2	27.5	0.092	31	0.103	11.96
3	22.5	0.075	23	0.077	2.67
4	28.1	0.094	30	0.100	6.38
5	43.8	0.146	42	0.140	4.11
6	76.3	0.254	77	0.257	1.18
7	61.9	0.206	58	0.193	6.31
8	59.4	0.198	54	0.180	9.09
9	64.4	0.215	61	0.203	5.58
10	76.3	0.254	42	0.140	44.88
11	145.6	0.485	146	0.487	0.41
12	116.3	0.388	116	0.387	0.26
13	102.5	0.342	106	0.353	3.22
14	101.3	0.338	95	0.317	6.21
15	113.8	0.379	108	0.360	5.01
16	235	0.783	230	0.767	2.04
17	193.1	0.644	188	0.627	2.64
18	165	0.550	159	0.530	3.64
19	156.9	0.523	152	0.507	3.06
20	157.9	0.525	151	0.503	4.19
21	319.4	1.065	312	1.040	2.35
22	226.9	0.756	225	0.750	0.79
23	221.9	0.740	216	0.720	2.7
24	204.4	0.681	204	0.68	0.15
25	210.6	0.702	213	0.710	1.14

Tabla 6.1. Frecuencias referenciales y experimentales.

Con los modelos 2.3, 2.4, 2.7 y 2.8 de los años 1969, 1972, 1979 y 1992 respectivamente, se construye la siguiente tabla de comparación de los resultados correlaciones con la frecuencia experimental de la campaña:

	Correlaciones				Frecuencia experimental [Hz]
	Gregory, G. A., Scott, D. S., 1969	Greskovich, E. J., Shrier, A. L., 1972	Heywood, N. I., Richardson, J. F., 1979	Nydal, O. J., et al., 1992	
1	0.00024618	1.55639848	0.00047275	0.00203464	0.093
2	0.00017603	0.9075571	0.00033805	0.00203252	0.103
3	0.00022418	0.85242799	0.00043051	0.00223324	0.077
4	0.00015392	0.42272954	0.00029558	0.00203464	0.100
5	0.0001582	0.35549895	0.00030379	0.00203205	0.140
6	0.00051882	3.17108652	0.00099631	0.00259864	0.257
7	0.00039672	2.00158317	0.00076183	0.00259278	0.193
8	0.00035266	1.36258583	0.00067723	0.00259171	0.180
9	0.00035392	1.00373197	0.00067964	0.00260291	0.203
10	0.0001582	0.35549895	0.00030379	0.00203205	0.140
11	0.00078272	4.6049668	0.00150311	0.00323393	0.487
12	0.0006331	3.10966988	0.00121577	0.00322323	0.387
13	0.00056666	2.19526766	0.00108819	0.00319892	0.353
14	0.00056963	1.63292896	0.00109389	0.00322263	0.317
15	0.00058267	1.46188767	0.00111894	0.00323185	0.360
16	0.00104264	5.9165264	0.00200223	0.003936	0.767
17	0.0008791	4.18093002	0.00168818	0.00393075	0.627
18	0.00081375	3.02059808	0.0015627	0.00394256	0.530
19	0.00080931	2.39601749	0.00155415	0.00394125	0.507
20	0.00081905	2.12699088	0.00157286	0.00393534	0.503
21	0.00130332	7.15401087	0.00250284	0.00470626	1.040
22	0.00104177	4.88049915	0.00200057	0.00441656	0.750
23	0.00106491	4.04917021	0.002045	0.00470877	0.720
24	0.00105293	3.1595066	0.002022	0.00470231	0.68
25	0.00106669	2.81464329	0.00204842	0.00470231	0.710

Tabla 6.2. Frecuencias correlacionales y experimentales.

Para el entendimiento de los valores de frecuencias, veamos que para el experimento de menor formación de tapones (evento 3 con 23 tapones), se tiene una frecuencia de 0.077 [Hz], mientras que el experimento con mayor formación (evento 21 con 312 tapones) la frecuencia asciende hasta 1.040 [Hz]. La interpretación de los resultados anteriormente mostrados se fortalece con las figuras 6.1 y 6.2, donde se condensan los conteos y frecuencias de los tapones referenciales y experimentales.

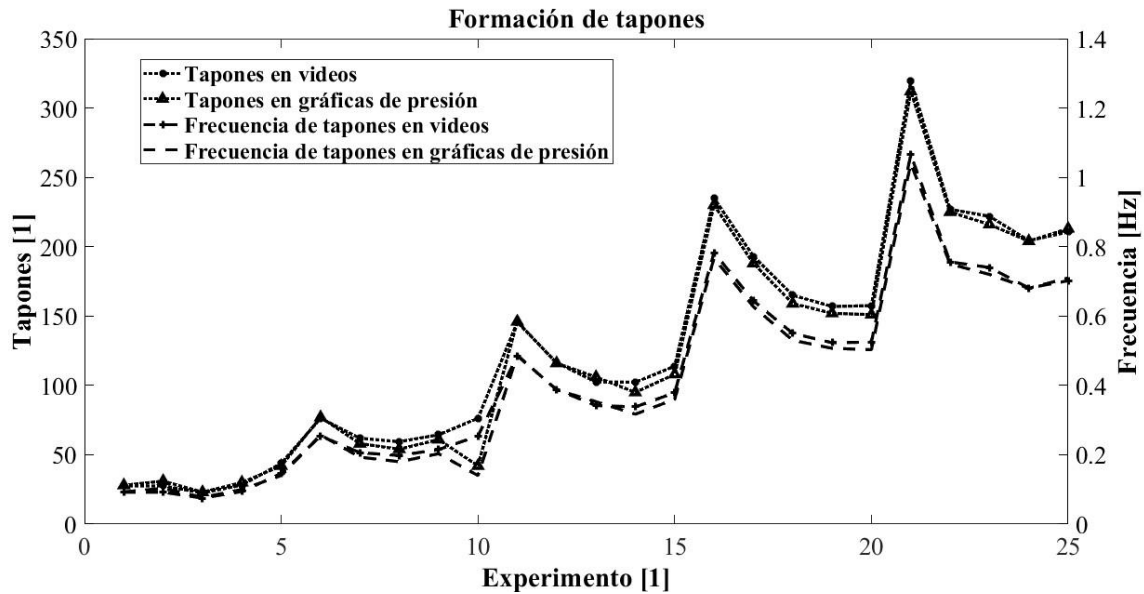


Figura 6.1. Frecuencias referenciales y experimentales.

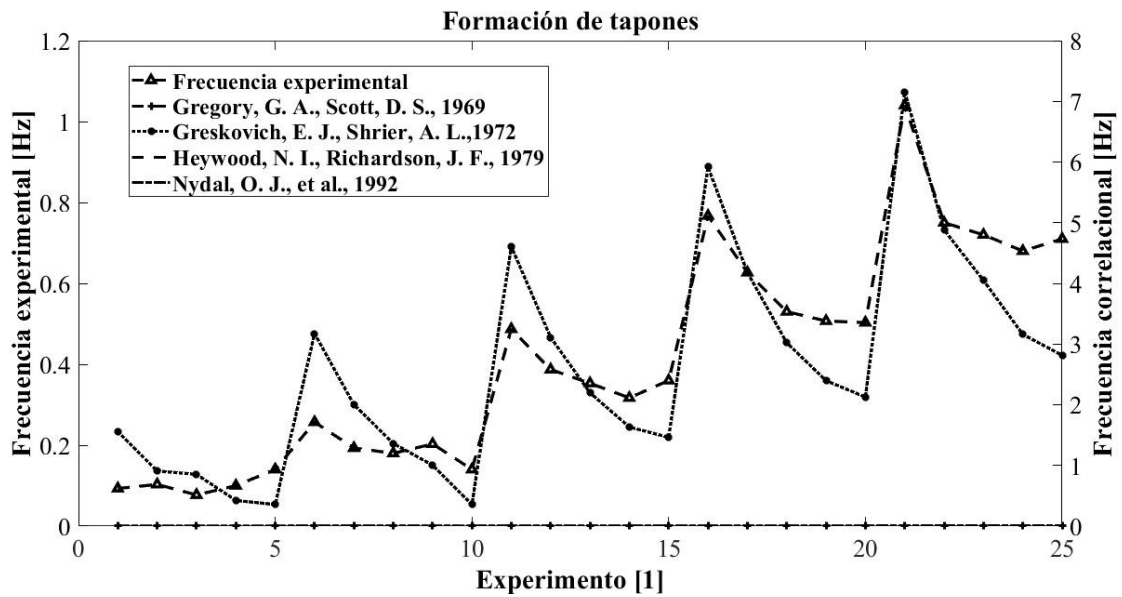


Figura 6.2. Frecuencias correlaciones y experimentales.

Las mediciones experimentales indican que se incrementa la aparición de tapones, como resultado al incremento de los gastos máscicos de líquido y gas. A su vez, del grupo de correlaciones predictivas para flujo bifásico líquido-gas de baja viscosidad que se expusieron en el capítulo 2, el modelo 2.4 resultó adecuado para predecir el comportamiento de la frecuencia al aumentar el gasto máscico de gas y líquido. Estando presente la velocidad superficial de la mezcla como principal aporte a esta predicción. Los resultados de la figura 6.2 mantienen una relación en los diámetros que se utilizan

en esta campaña experimental y en la correlación de 1969 sobre la cual se basa la de 1972. Que en suma se formula para el patrón de flujo intermitente con la manifestaciones de tapones.

6.2. VELOCIDAD LOCAL PROMEDIO DE LOS TAPONES

La concepción final del método no invasivo con la primera derivada de señales de presión para la determinación de velocidades locales promedio de tapones considera, una vez que las velocidades se calcularon, el intervalo de tiempo promedio por experimento en el que un tapón atraviesa el arreglo de transductores. Con esa información se extrae la desviación estándar a fin de proyectar la pertinencia de las mediciones de tiempo y su tendencia respecto al promedio. En cuanto a la manifestación de las unidades de tapones sobre las gráficas de presión, se tiene una presión máxima bajo la cual aparecen, ver expresión 6.1, y una estimación de la presión de los cuerpos de los tapones, que se da a partir de la expresión 6.2. Ver figura 6.3.

$$P_{\text{unidades de tapón}} = P_{\text{máxima}} \quad (6.1)$$

$$P_{\text{cuerpo de tapón}} = P_{\text{máxima}} - P_{\text{mediana}} \quad (6.2)$$

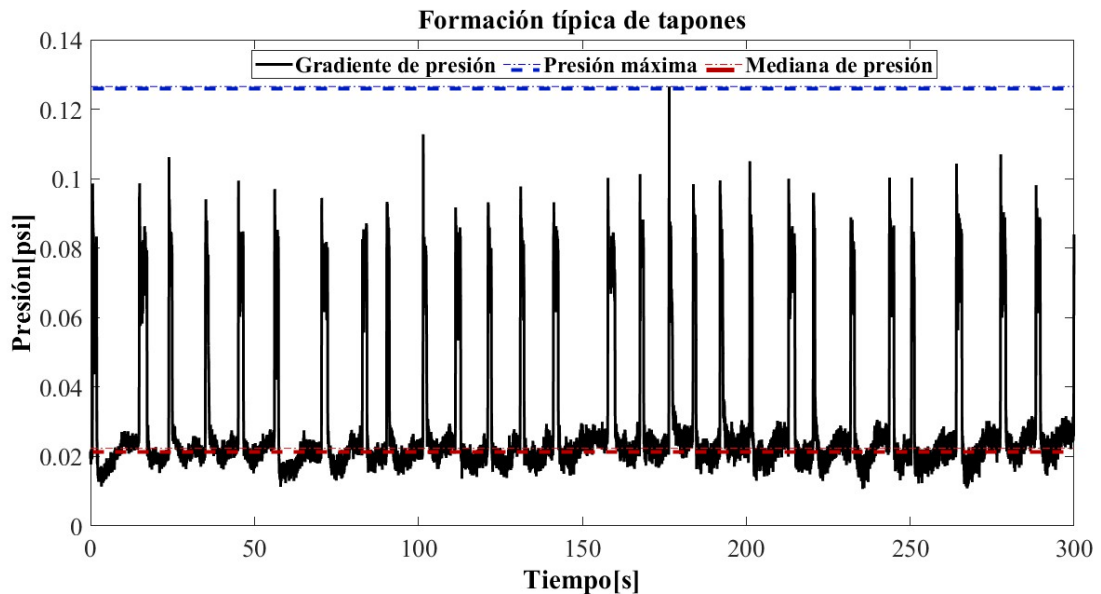


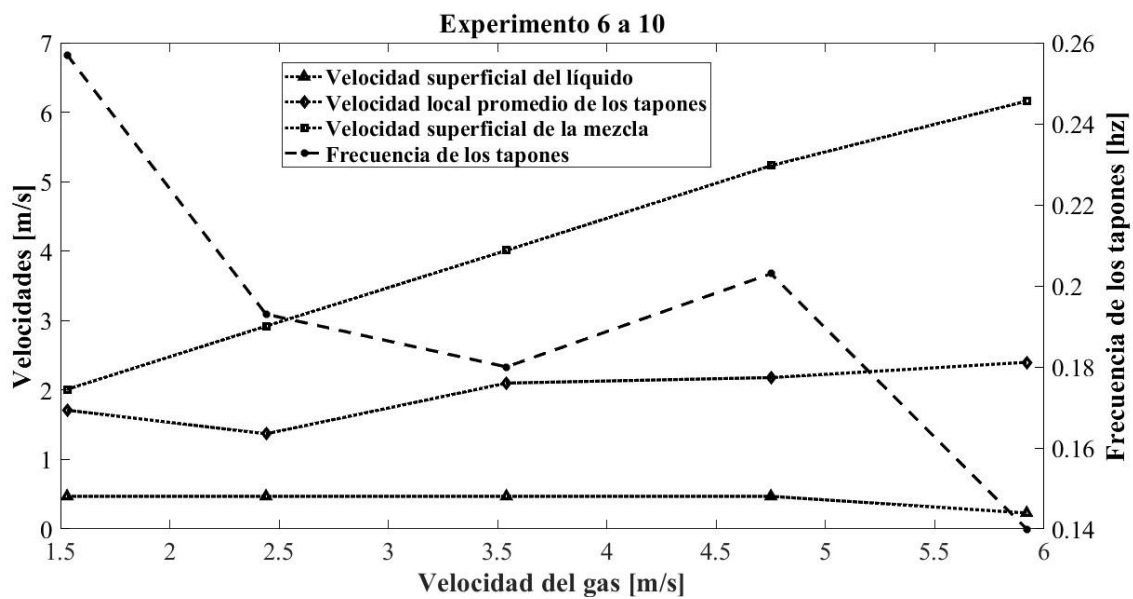
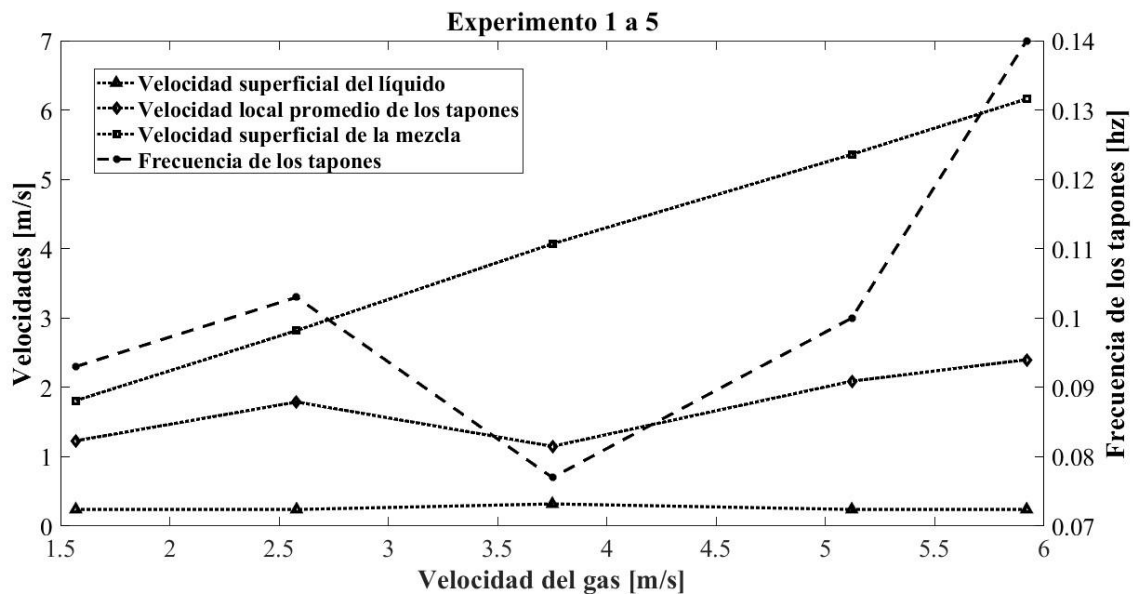
Figura 6.3. Presiones de unidades de tapón y cuerpos de tapón.

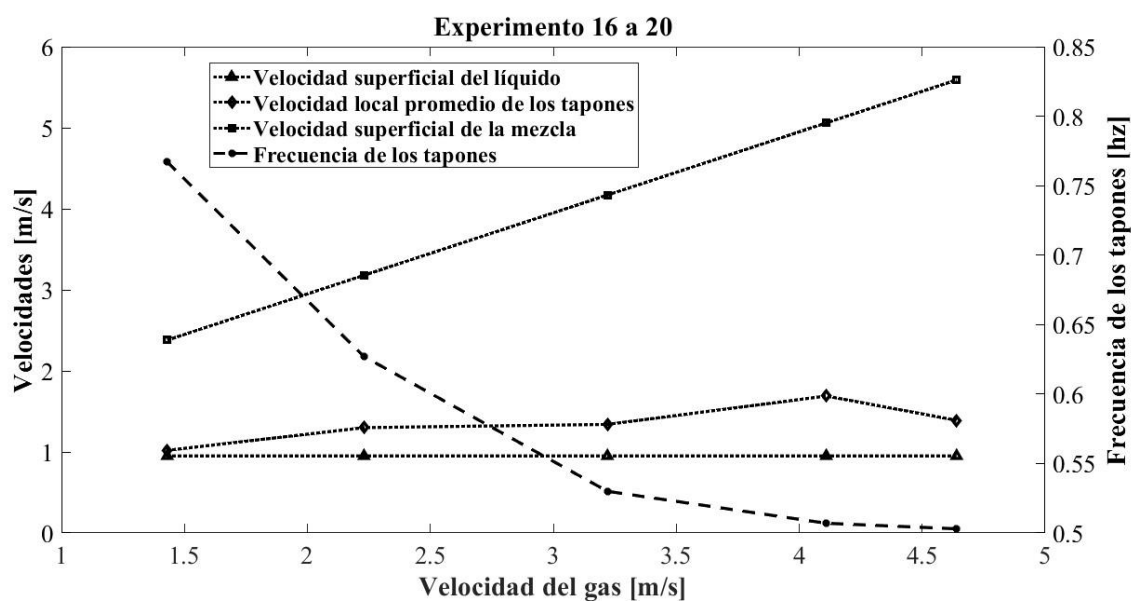
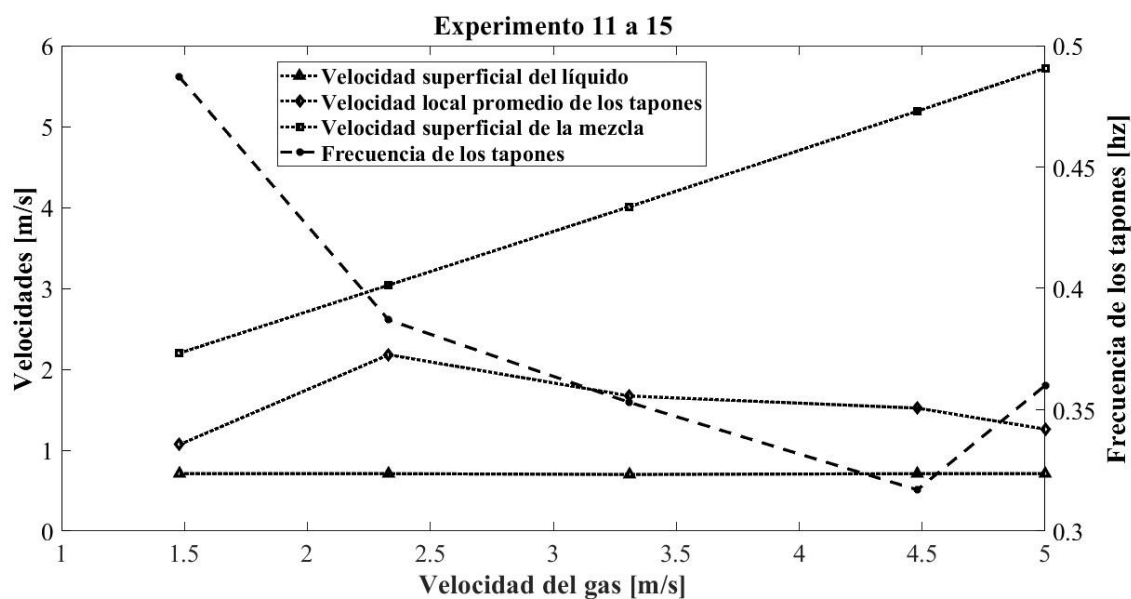
Con el aumento del flujo másico de líquido a la tubería se advierte un incremento al gradiente de presión que se define para las columnas de medición entre los transductores instalados. Además, con el aumento de la velocidad superficial de la fase gaseosa se ve afectada la retención de líquido en la tubería, lo que generaría una producción menor de tapones y en consecuencia valores más pequeños para la frecuencia asociada. Esta es la razón por la cual no se tiene el valor más alto de la frecuencia para el último experimento de la campaña, y menos, la velocidad local de tapones.

	u_{sm} $\left[\frac{m}{s}\right]$	u_{lt} $\left[\frac{m}{s}\right]$	$\bar{\Delta}t$ [s]	σ [1]	Precisión [1]	Intervalo de tiempo [s]	Amplitud de presión máxima de la señal [kPa]	Amplitud de presión del cuerpo del tapón [kPa]
1	1.81	1.23	0.80	0.28	0.19	$0.61 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.98$	0.76	0.69
2	2.82	1.79	0.34	0.24	0.13	$0.21 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.47$	1.24	1.17
3	4.07	1.16	0.67	0.32	0.15	$0.52 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.82$	2.14	1.93
4	5.36	2.09	0.56	0.21	0.06	$0.50 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.63$	2.62	2.41
5	6.16	2.40	0.49	0.16	0.04	$0.45 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.53$	3.24	3.10
6	2.01	1.71	0.57	0.08	0.03	$0.54 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.59$	0.76	0.69
7	2.92	1.54	0.47	0.19	0.11	$0.36 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.58$	1.10	0.90
8	4.01	2.10	0.50	0.14	0.05	$0.45 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.55$	1.93	1.86
9	5.23	2.18	0.58	0.3	0.07	$0.51 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.65$	3.17	3.03
10	6.16	2.40	0.49	0.16	0.04	$0.45 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.53$	3.24	3.10
11	2.2	0.99	1.38	0.65	0.09	$1.29 \leq \bar{\Delta}t \leq 1.47$	0.69	0.62
12	3.04	2.19	0.48	0.14	0.06	$0.42 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.53$	0.96	0.83
13	4.01	1.67	1.01	0.98	0.21	$0.79 \leq \bar{\Delta}t \leq 1.22$	2.55	2.50
14	5.19	1.52	0.74	0.23	0.05	$0.69 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.79$	3.80	3.65
15	5.72	1.26	0.92	0.36	0.06	$0.86 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.98$	3.17	3.10
16	2.38	1.02	1.22	0.61	0.13	$1.09 \leq \bar{\Delta}t \leq 1.35$	0.69	0.55
17	3.18	1.30	1.13	0.12	0.12	$1.01 \leq \bar{\Delta}t \leq 1.25$	1.10	0.96
18	4.17	1.34	0.93	0.56	0.1	$0.84 \leq \bar{\Delta}t \leq 1.03$	3.17	3.10
19	5.06	1.69	0.73	0.28	0.04	$0.51 \leq \bar{\Delta}t \leq 1.69$	5.17	5.10
20	5.59	1.35	0.85	0.28	0.04	$0.81 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.89$	5.80	5.65
21	2.54	1.66	0.73	0.36	0.09	$0.64 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.82$	0.69	0.62
22	3.24	1.94	0.59	0.3	0.09	$0.50 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.68$	1.24	1.10
23	4.08	2.16	0.56	0.24	0.04	$0.53 \leq \bar{\Delta}t \leq 0.60$	1.51	1.31
24	5.01	1.70	0.86	0.56	0.07	$0.48 \leq \bar{\Delta}t \leq 2.43$	3.90	3.65
25	5.52	1.50	1.1	0.81	0.12	$0.98 \leq \bar{\Delta}t \leq 1.21$	5.51	5.30

Tabla 6.3. Aproximación a la velocidad local de tapones.

Gráficamente, esta tabla se ve de la siguiente manera, donde se presenta la frecuencia de los tapones en función de la velocidad superficial del gas, ver figura 6.4.





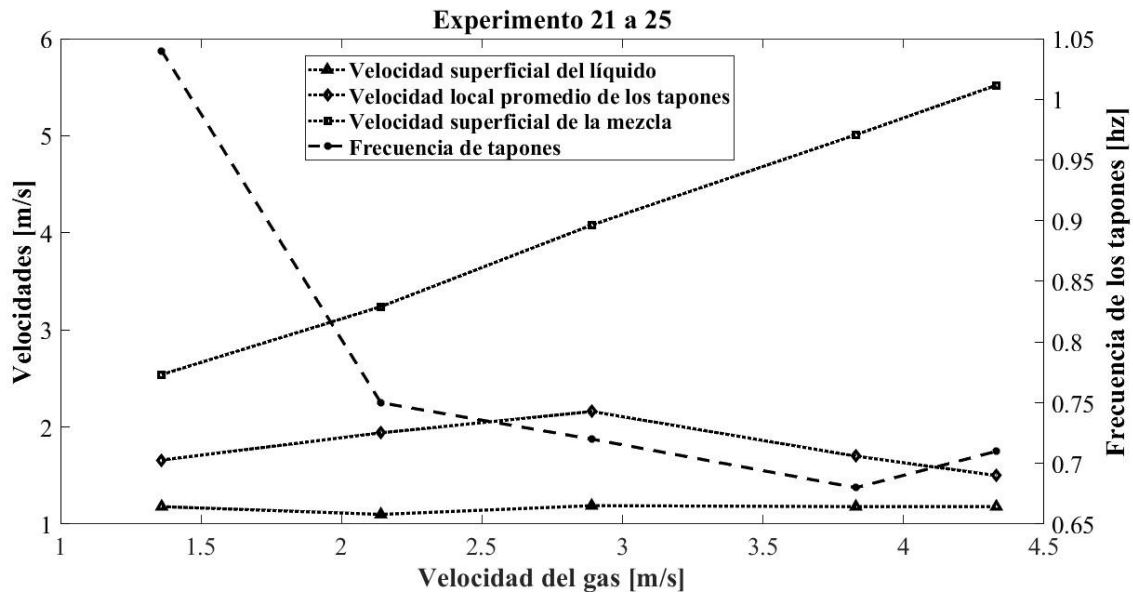
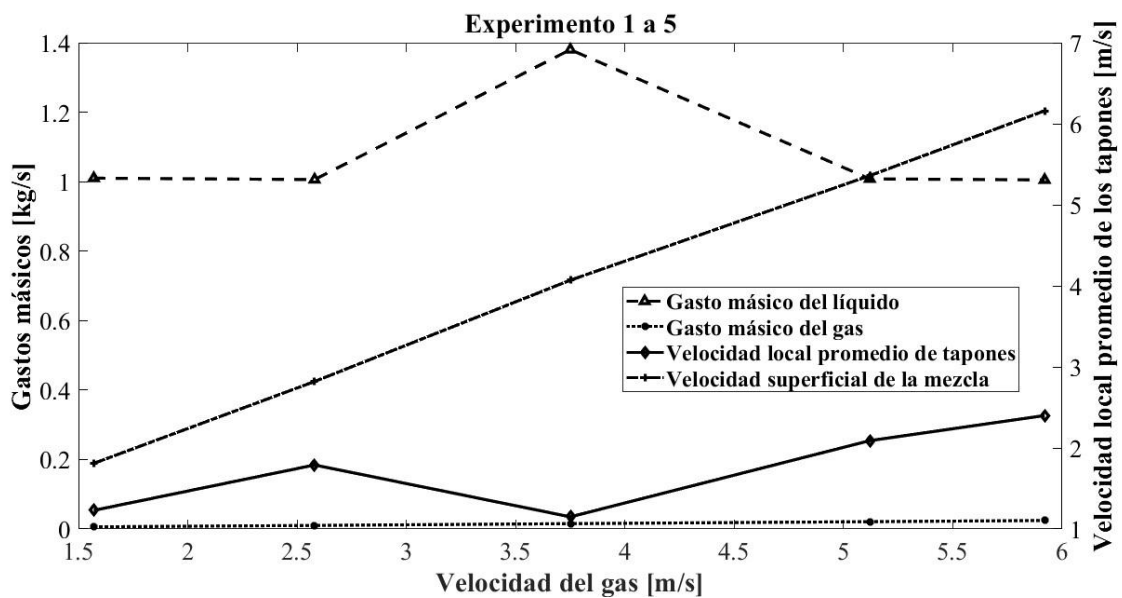
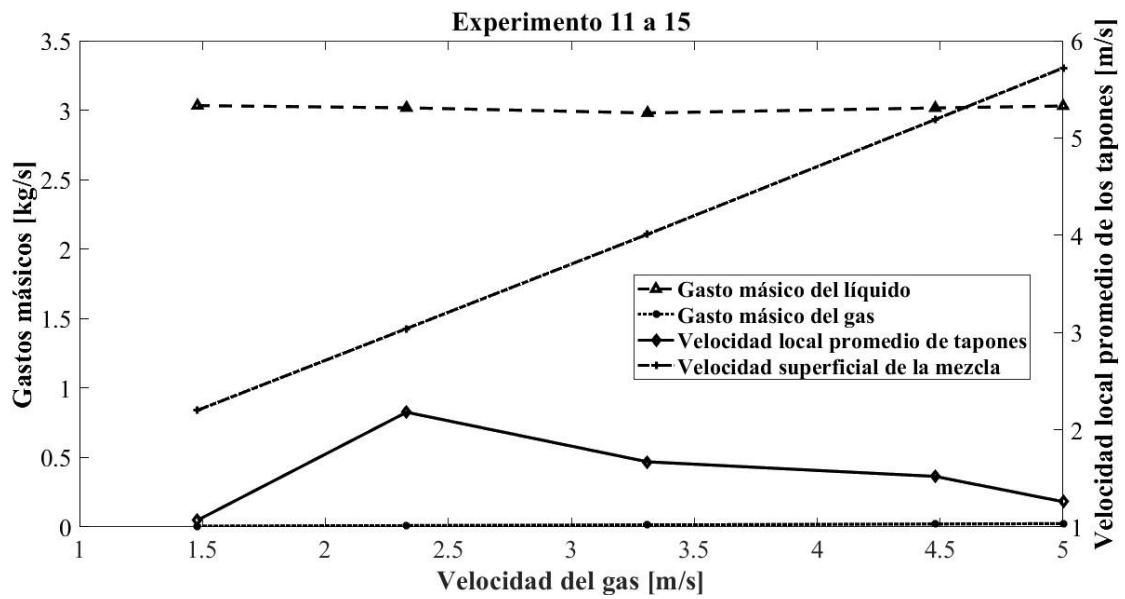
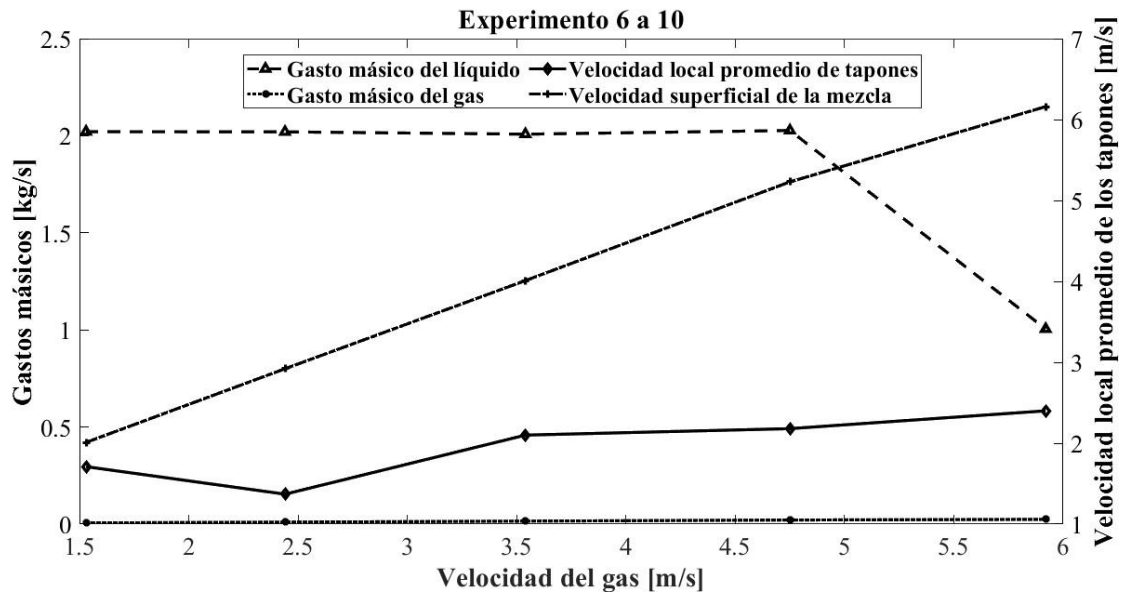


Figura 6.4. Velocidades características y frecuencia de formación de los taponamientos.

En relación con las velocidades características del flujo (de líquido, de gas, y de mezcla), es notable que el comportamiento de la frecuencia atraviesa por completo a las velocidades, reafirmando su relación con el crecimiento de la velocidad superficial de la mezcla, que tiene el principal aporte de la fase gaseosa. Simultáneamente, la velocidad de la mezcla establece el límite para la velocidad de los taponamientos, la cual es sutilmente mayor a la de la fase líquida, tal y como se advierte en la bibliografía. Ahora bien, cuando se ubica la velocidad local de los taponamientos y la velocidad superficial de la mezcla relativas a los gastos máscicos de líquido y gas, se observa lo inmediato:





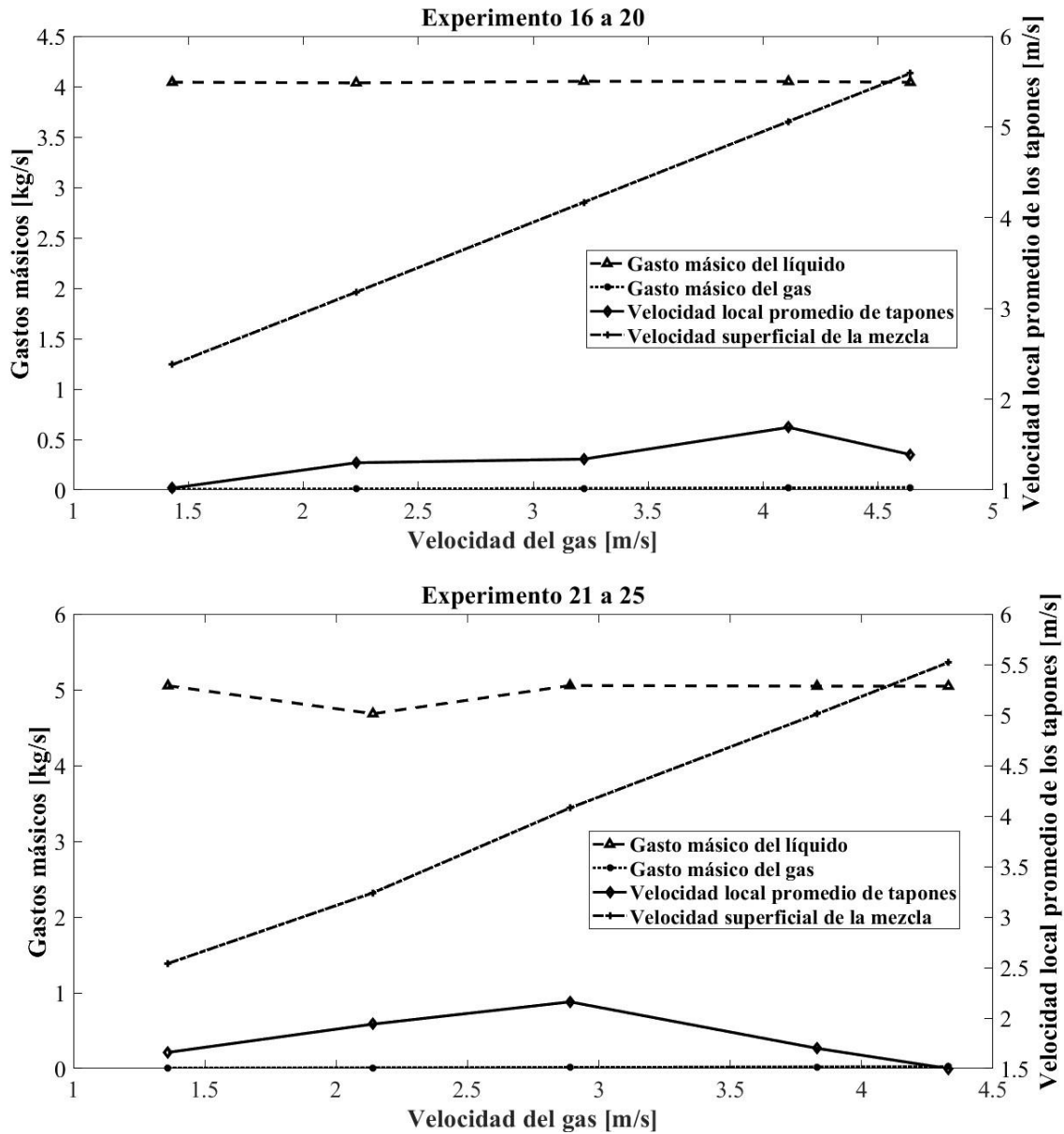
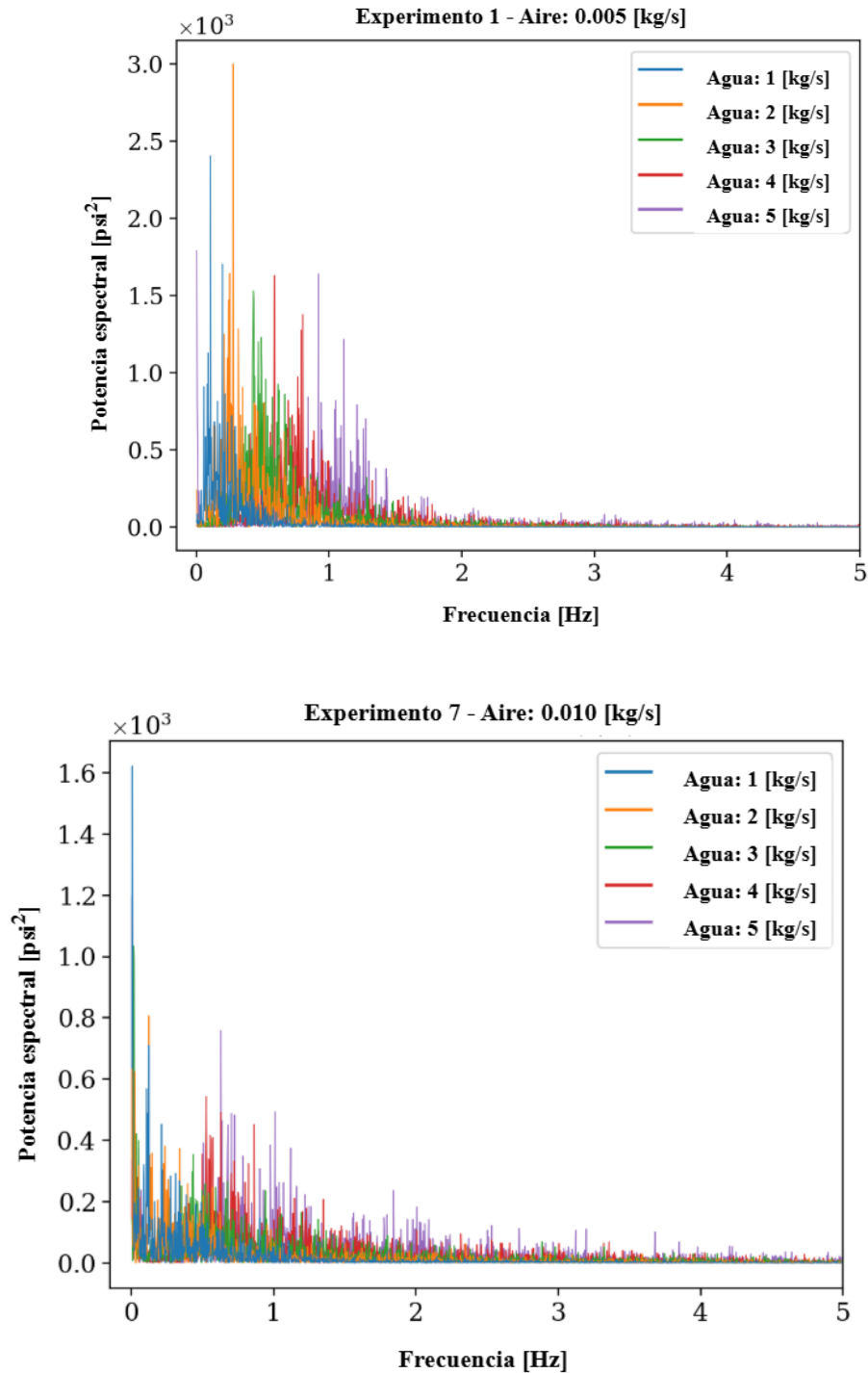


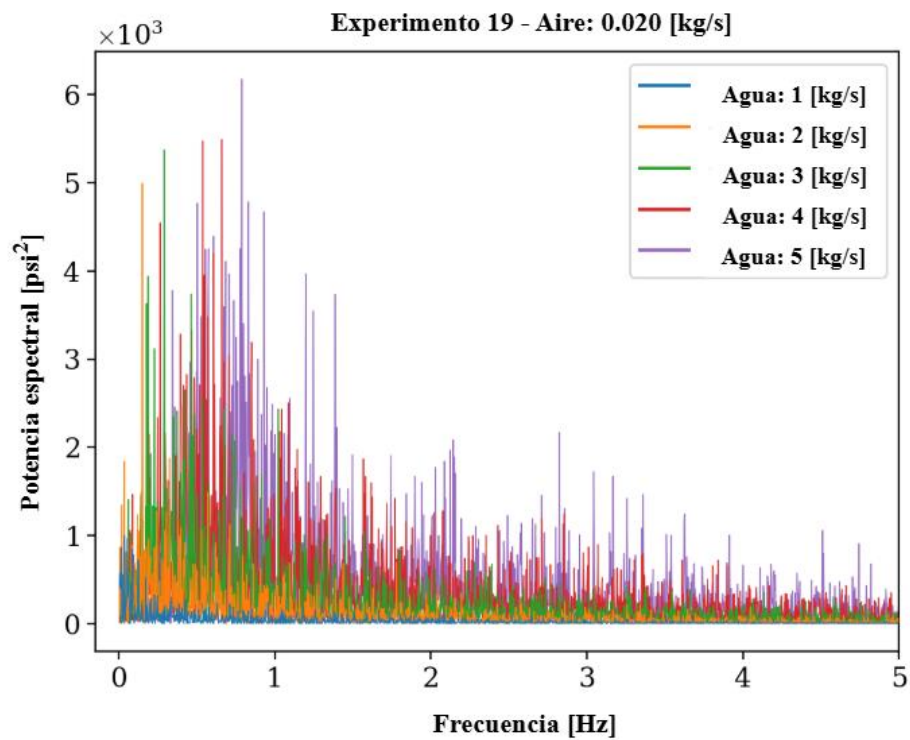
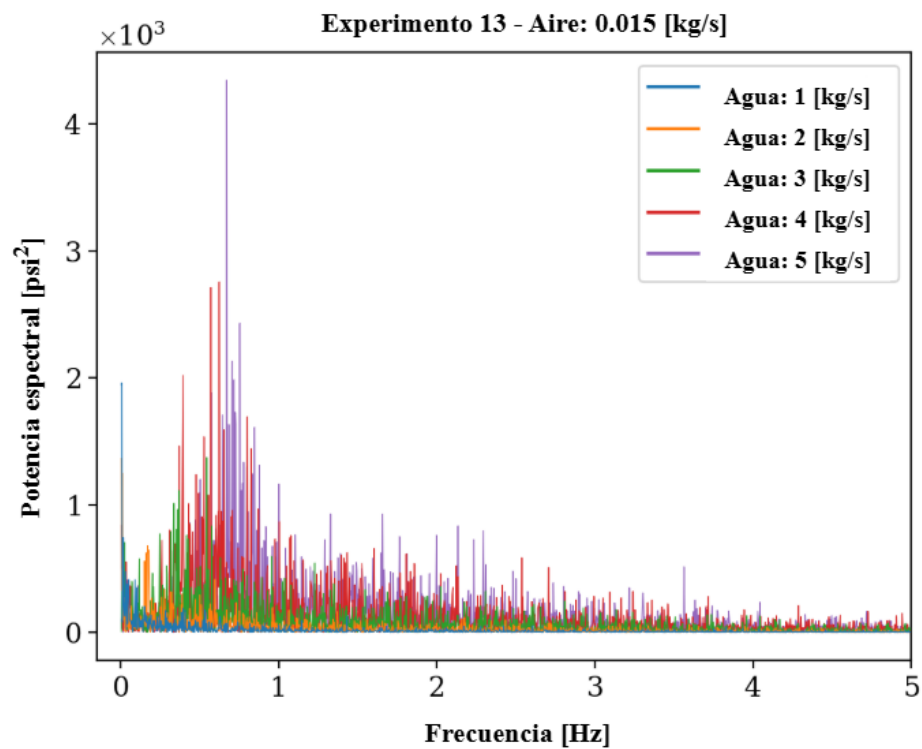
Figura 6.5. Velocidades características y gastos másicos de la matriz experimental.

La idea del párrafo anterior se refuerza con la figura 6.5, donde se distinguen tendencias de forma entre las curvas de la velocidad de la mezcla y la velocidad local de tapones para gastos másicos bajos a medios en la campaña experimental. En términos de la velocidad superficial del gas esto indica un intervalo de $1 < u_{sg} \left[\frac{m}{s} \right] < 3$.

6.3. DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA

Para la interpretación de los espectros de potencia, se toma de la matriz experimental que se mostró en la tabla 4.3, el comportamiento de la fase líquida respecto a la gaseosa fija, es decir:





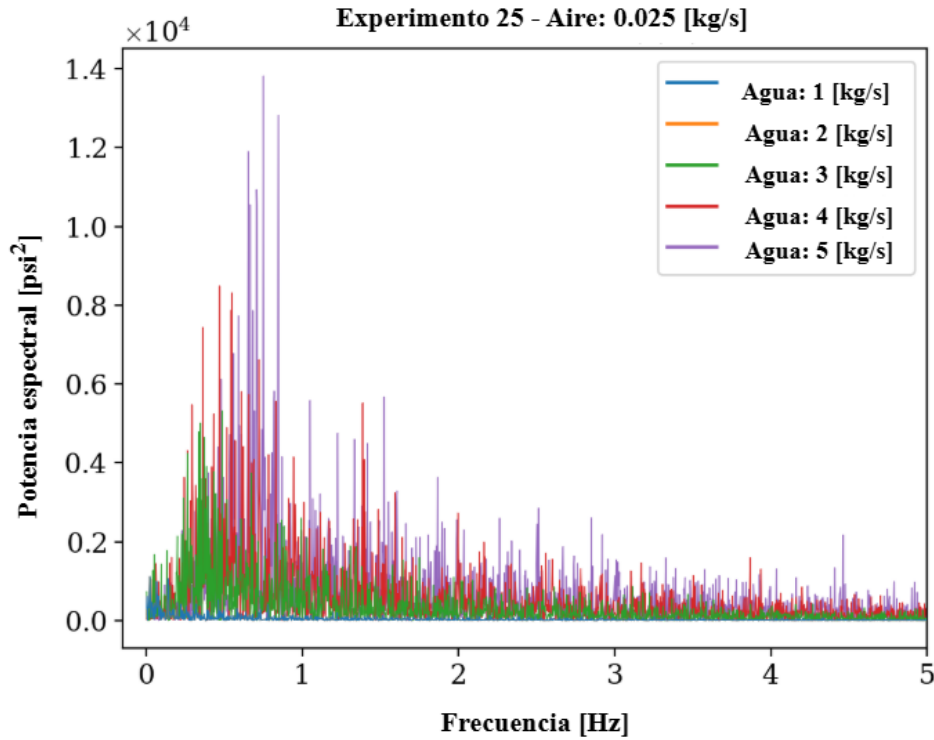
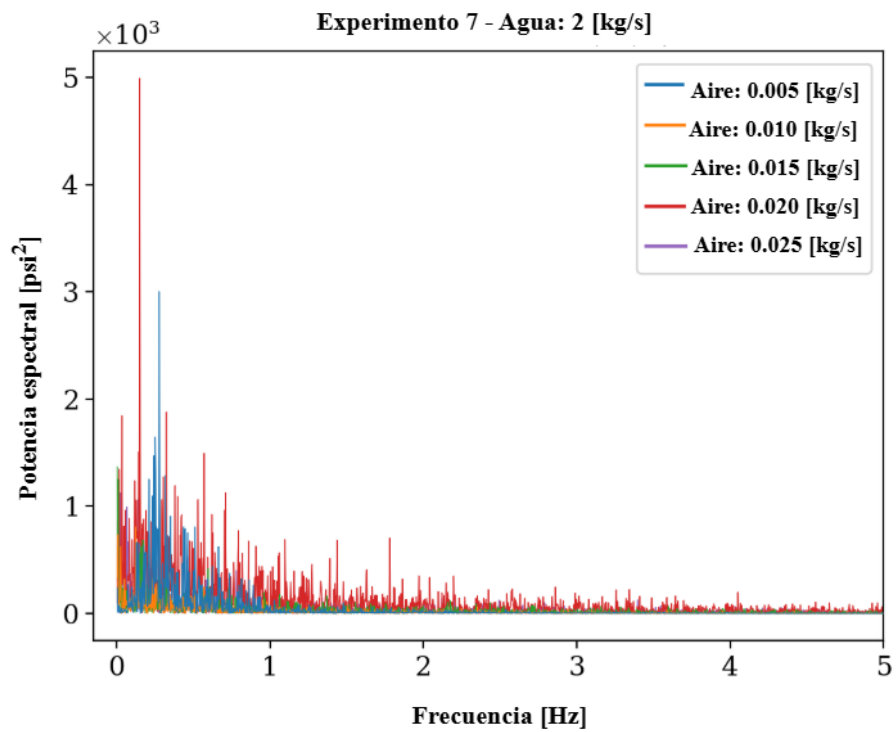
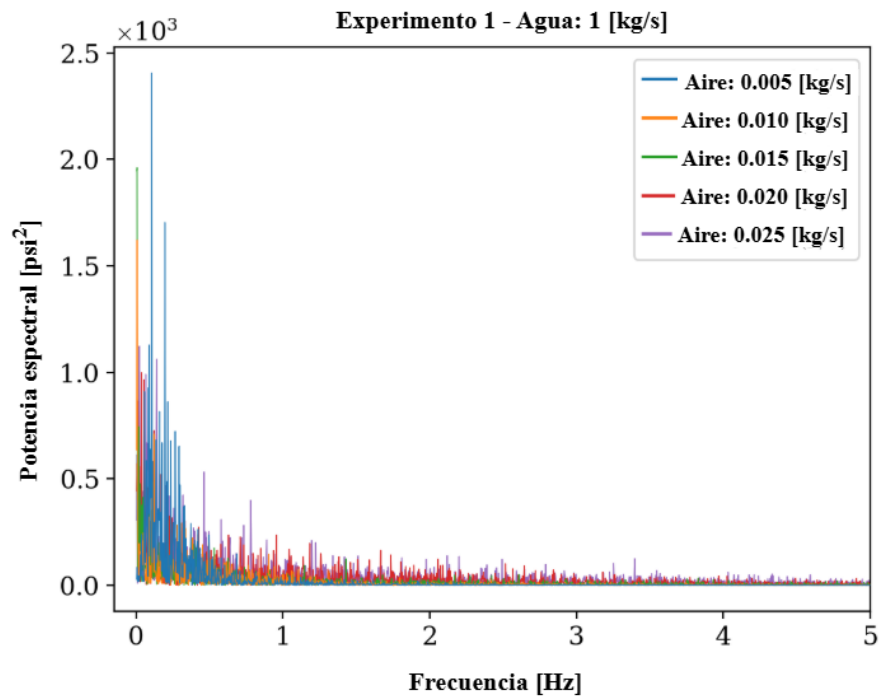
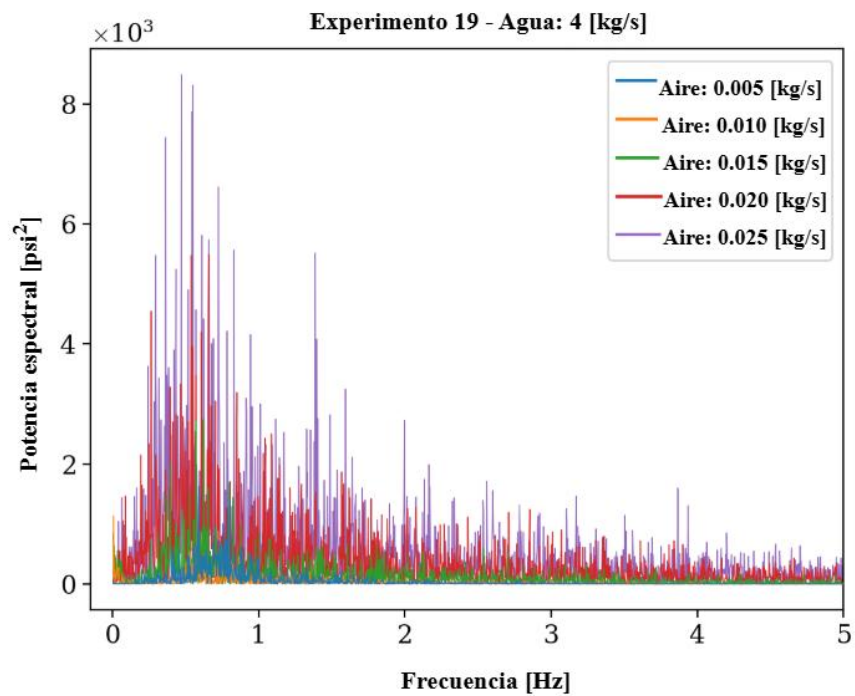
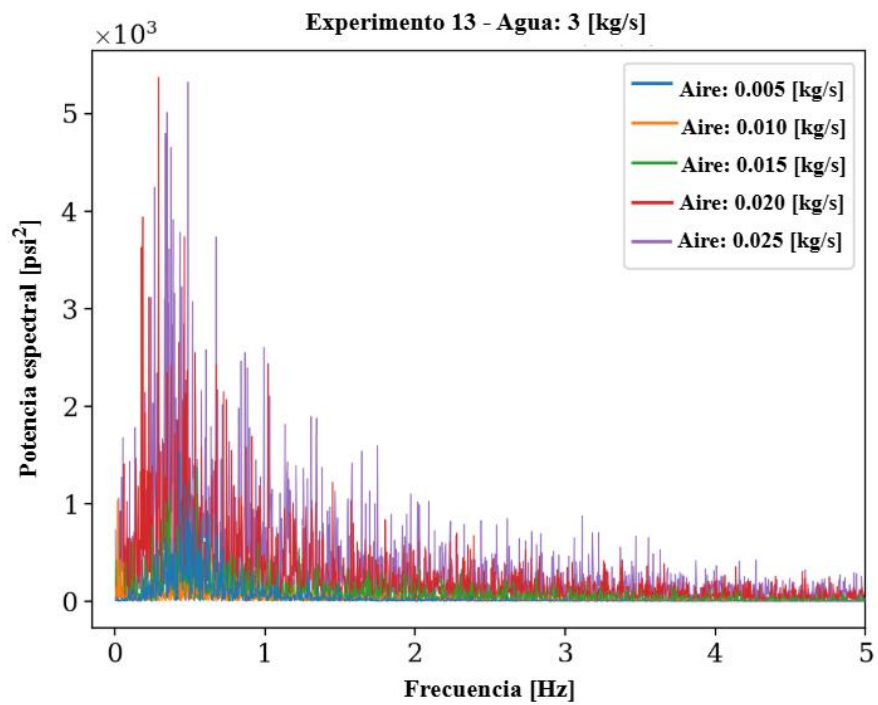


Figura 6.6. Densidad espectral de potencia en la diagonal principal con gas fijo.

Con los espectrogramas mostrados anteriormente, se expone la tendencia al aumento energético con el aumento de caudales de líquido. Con gastos altos de aire ($0.015 \leq \dot{m}_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \leq 0.025$), se tiene el mayor aporte de potencia espectral, específicamente con el caudal líquido de $\dot{m}_l \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = 5$, que se asocia a las mayores formaciones de tapones en toda la matriz experimental.

En el segundo caso, se tiene el comportamiento de la fase gaseosa respecto a la fase líquida fija. Ver figura 6.7. Como se mostró en el capítulo 2 respecto a los patrones de flujo bifásico horizontal, la formación de tapones se da en porciones de caudal líquido y gas moderados. Es decir, durante esta formación, el gas penetra el líquido que obstruye el área de sección transversal, y otra buena parte de ese aire coalesce a los tapones en forma de burbujas. En consecuencia, los tapones líquidos que estén altamente aereados presentan mayor potencia espectral, tal como se observa en los intervalos de líquido correspondientes a $4 \leq \dot{m}_l \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \leq 5$ con una inyección de gas de hasta $\dot{m}_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = 0.025$.





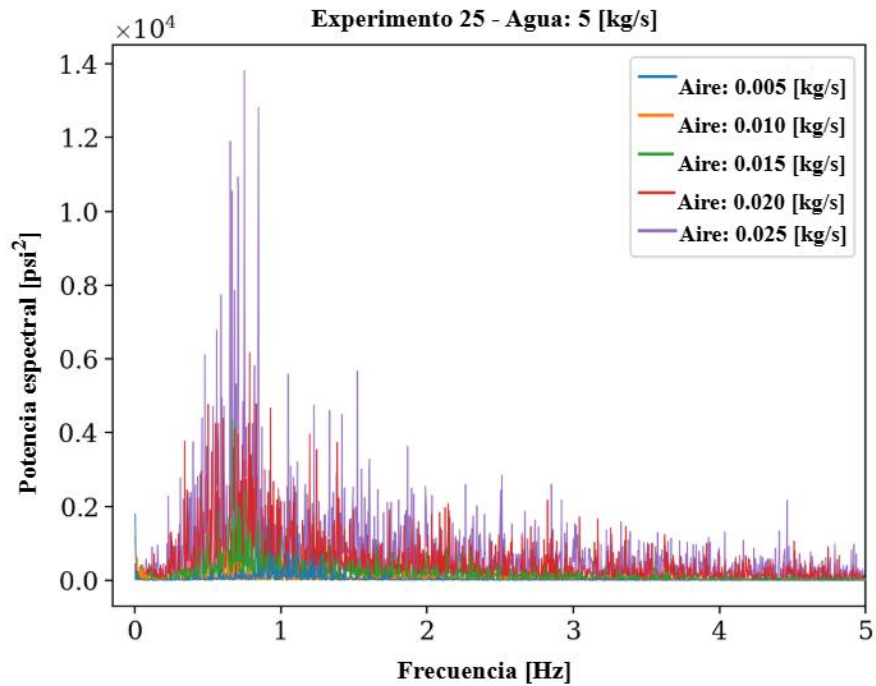


Figura 6.7. Densidad espectral de potencia en la diagonal principal con líquido fijo.

En conjunto con la figura 5.6, la tabla 5.5 y el complemento de la figura 5.7, se relaciona la descomposición espectral de la señal de adquisición con la frecuencia de formación física de los tapones. Que si bien se tienen una pérdida energética entre los transductores posicionados a un metro de distancia, el comportamiento de este bloqueo a la sección transversal de la tubería de visualización se mantiene a lo largo de su longitud.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Con el término del actual estudio, se tienen disponibles dos guías de interés para el análisis de los tapones que se manifiestan en el patrón de flujo intermitente. La primera de ellas constituye el uso del método no invasivo al sistema de tuberías para la estimación de las velocidades locales promedio de los tapones. Este método complementa el uso de instrumentación de alta tecnología como transductores ultrasónicos o tomógrafos de capacitancia eléctrica. Los valores experimentales obtenidos para las velocidades fueron verificados con la campaña de videograbación cuadro a cuadro, resultando en alta compatibilidad tal como se muestra en el capítulo 6 con el conteo de los tapones en las gráficas de las señales de presión. Los mayores valores de compatibilidad tienen lugar en el rango de experimentos 5, 10, 15, 20 y 25, asignados a los últimos eventos de cada fila con el mayor caudal de gas inyectado ($\dot{m}_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = 0.025$) y líquido. En cambio, los picos que se manifiestan en la figura 6.1 representan los experimentos con el menor caudal de gas, esto es $\dot{m}_g \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = 0.005$.

Se debe agregar que gran parte de la bibliografía especializada expresa únicamente los límites mínimos y máximos para la evolución de la velocidad local de tapones en la tubería, en función de la velocidad superficial del líquido (u_{sl}) y la velocidad de la mezcla (u_{sm}). Con el método propuesto en este documento se obtiene una proporcionalidad directa entre la velocidad local de los tapones (u_{lt}) y la velocidad de la mezcla (u_{sm}) que va desde el 22 % hasta el 85 % de las veces. Donde los experimentos del bloque 2 (experimentos 6 a 10) y bloque 3 (experimentos 11 a 15) mantienen las relaciones más altas y corresponden a los gastos másicos medios de líquido que se encuentran en el rango de $2 \leq \dot{m}_l \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \leq 3$, respecto al resto de la campaña experimental.

Por su lado, del grupo de correlaciones predictivas seleccionado para examinar el comportamiento de los resultados experimentales de este trabajo, la de 1972 (Greskovich, E. J., Shrier, A. L., 1972) que considera los efectos de la retención de líquido en la tubería y un diámetro de 0.019 [m], mantuvo un comportamiento idéntico al de los resultados experimentales de esta tesis, sugiriendo que la frecuencia de formación de tapones es inversamente proporcional al diámetro de la tubería.

En ese mismo sentido, con la visualización de la figura 6.4, donde se observa claramente la diferencia entre las velocidades superficiales y la velocidad local promedio de los tapones, se distingue que para bajos gastos de gas y líquido, la proporción de la velocidad local promedio de los tapones respecto a la velocidad superficial de la mezcla es mayor. Esta idea se refuerza en la figura 6.5, en la cual se representan los gastos másicos, y se mantiene la misma relación.

La segunda orientación en camino a la interpretación del comportamiento de los tapones, es la disponibilidad de las gráficas de presión para visualizar las porciones de las unidades de tapón. Permitiendo la identificación procedente de las formaciones de los tapones, de la cual es fácilmente distinguible lo que no es de interés para el estudio, como pseudo tapones o ruido en la señal, y de forma global, la frecuencia asociada a los tapones. En toda la campaña se tuvo un intervalo de formaciones de 28 hasta 312 tapones, con frecuencias asociadas de $0.093 \leq f_t \left[\frac{\text{tapones}}{\text{segundo}} \right] \leq 1.040$, respectivamente.

Con fluctuaciones que se explican con el aumento de la velocidad superficial de la fase gaseosa, afectando la retención de líquido en la tubería. La accesibilidad de esta información se da por la

instrumentación de transductores de presión en un rango predeterminado de $0 \leq P[\text{psi}] \leq 15$, para la cual se tienen expresamente definidas las rutas de instalación.

Finalmente, con la exposición de los periodogramas en los cuales se muestran las densidades espectrales de potencia con las bandas de mayor aporte energético ($0 [\text{Hz}] \leq f \leq 2 [\text{Hz}]$) en los 50 [Hz] para la adquisición. Estas bandas coinciden con la frecuencia de formación de los tapones, y en suma con el barrido de la fase gaseosa en la fase líquida fija, donde se muestran los picos de potencia espectral, asociados al mayor número de tapones formados y sus concentraciones.

7.1. TRABAJO FUTURO

Por lo que respecta a las condiciones de experimentación, es posible modificar algunos accesorios del circuito cerrado, tales como válvulas de paso para la inyección de aire comprimido, el reemplazo de transductores de presión con un rango de $0 \leq P[\text{psi}] \leq 15$ a un rango menor de $0 \leq P[\text{psi}] \leq 5$. En tanto que es recomendable incrementar el número de registros por experimento (30 000 registros cada 5 minutos) con una frecuencia de adquisición de señales de presión de hasta 100 [Hz]. En cuanto a la relación entre la velocidad local promedio de los tapones y la velocidad de la mezcla, se vio en la figura 6.5 que para velocidades superficiales bajas de gas se mantenía similitud entre la representación de estas velocidades por sus curvas, mientras que para velocidades superficiales altas de gas, estas formas presentaban divergencias, esto es, la velocidad de mezcla se incrementaba y la velocidad local promedio de tapones disminuía. Con todo esto, y en sintonía con los resultados experimentales, es conveniente incrementar los gastos máscicos de aire para aumentar la velocidad de la mezcla y en consecuencia los casos de estudio de la matriz experimental propuesta en el capítulo 4.

Todas estas observaciones se relacionan con la validación y aplicación de esta metodología a un caso de la industria, donde se examinará el transporte de gas natural que se tiene en la más reciente ampliación del gasoducto “Energía Mayakán”, construido por la empresa francesa Engie. Para esto se partirá desde una correcta identificación y distribución de las fases en relación con el volumen empaquetado para su trasiego, esto con base en la norma oficial mexicana NOM-001-SECRE-2010 donde se exponen las especificaciones del gas natural que se entrega en puntos de inyección a los sistemas de transporte asignados, almacenamiento, distribución y puntos de transferencia de custodia. Con ello, se determinará la pertinencia de este estudio para obtener la caracterización de tapones presentes en el flujo, en caso de manifestarse.

La complicación en este problema se tendrá con la presencia de altas concentraciones de nitrógeno y agua en las producciones de Petróleos Mexicanos para el gas natural, que se bombea dentro de un gasoducto de 36 [in] desde Tabasco hasta Yucatán, donde se despacha este energético para su aprovechamiento en centrales de Comisión Federal de Electricidad para la generación de energía eléctrica.

REFERENCIAS

Archibong-Eso, A., Baba, Y., Aliyu, A., Zhao, Y., Yan, W., Yeung, H. On slug frequency in current high viscosity liquid and gas flow. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 163. 2018, pp. 600-610.

Gregory, G.A., Scott, D.S. Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow. *AIChE J.* 15 (6). 1969, pp. 933–935.

Greskovich, E. J., Shrier, A. L. Slug frequency in horizontal gas-liquid slug flow. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 11 (2). 1972, pp. 317-318.

Heywood, N. I., Richardson, J. F. Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: determination of liquid holdup by gamma-ray absorption. *Chem. Eng. Sci.* 34. 1979, pp. 19-30.

Nydal, O. J., Pintus, S., Andreussi, P. Statical characterization of slug flow in horizontal pipes. *Int. J. Multiphas. Flow.* 18. 1992, pp. 439-453.

Taitel, Y., Dukler, A. E. A model for slug frequency during gas-liquid flow in horizontal and near horizontal pipes. *Int. J. Multiphase Flow.* Pergamon/Elsevier. 1977, pp. 585-596.

Hoogendoorn, C. J. Gas-liquid flow in horizontal pipes. *Chemical Engineering Science*. 1959, pp. 205-217.

Lockhart, R., Martinelli, R. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chemical Engineering Science*. 45, 1949, pp. 39-48.

Xing, L., Yeung, H., Shen, J., et al. Experimental study on severe slugging mitigation by applying wavy pipes. *Chemical Engineering Research and Design*. 91, 2013, pp. 91, 18-28.

François, A., Flandrin, P. Improving the Readability of Time-Frequency and Time-Scale Representations by the Reassignment Method. *IEEE® Transactions on Signal Processing*. 43, 1995, pp. 1068–1089.

Brill James, P., Beggs H., Dalle. (1991). *Two-Phase Flow in Pipes*. Oklahoma Texas: Tulsa University Press.

Intec Engineering, Inc. Gulf of Mexico Deepwater Staged Recovery System. (2001). Deepstar IV Project. Flow Assurance Design Guideline.

Makagon, Y. (2009). *Handbook of Multiphase Flow assurance*. Massachusetts: Gulf Professional Publishing. An imprint of Elsevier.

Al-Safran Eissa, M., Brill James, P. (2017). Applied Multiphase Flow in Pipes and Flow Assurance Oil and Gas Production. Texas: Society of Petroleum Engineers Inc.

Brill James, P., Mukherjee, H. (1999). Multiphase Flow in Wells. Texas: Society of Petroleum Engineers Inc.

Oppenheim, Alan V., et al. (1999). Discrete-Time Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.

Romero, G. (Ed.). (2011). Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data. InTech. doi: 10.5772/699.

Instituto de Ingeniería (IINGEN UNAM). (2025). Laboratorio de Hidromecánica. [https://www.iingen.unam.mx/es-mx/Investigacion/Capacidades Experimentales/Hidromecanica/Paginas/default.aspx](https://www.iingen.unam.mx/es-mx/Investigacion/CapacidadesExperimentales/Hidromecanica/Paginas/default.aspx)

Secretaría de Energía (SENER). (2023). Sexto Informe de Labores de la Secretaría de Energía 2023-2024, 1 de septiembre de 2024. <https://base.energia.gob.mx/IL/6-Informe-de-Labores-SENER.pdf>

Secretaría de Energía (SENER). (2023). Prospectiva de petróleo crudo y petrolíferos 2023-2037. https://base.energia.gob.mx/Prospectivas23/PPP_23-37.pdf.

Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH). (2023). Reporte de la consolidación de reservas de la nación al 1 de enero de 2023. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/821834/Reporte_Consolidación_Reservas_2023.pdf.

Petróleos Mexicanos (PEMEX). (2024). Estadísticas petroleras. Informe mensual sobre producción y comercio de hidrocarburos. <https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Indicadores%20Petroleros/indicador.pdf>.

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2019). ACUERDO que modifica al diverso por el que se emite la Política Pública de Almacenamiento Mínimo de Petrolíferos. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5581171&fecha=06/12/2019#gsc.tab=0

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Demanda de petrolíferos por sector (SENER, 2023).

Tabla 1.2. Autonomía de petrolíferos seleccionados (DOF, 2019).

Tabla 1.3. Producción de crudo en México (2022-2024) (PEMEX, 2024).

Tabla 2.1. Estadísticas de petrolíferos 2023 y 2024 (SENER, 2023).

Tabla 2.2. Sistema Nacional de Refinación (SENER, 2023).

Tabla 2.3. Producción de petrolíferos (PEMEX, 2024).

Tabla 2.4. Producción de crudo e hidrocarburos líquidos en México por zona (2021-2022) (PEMEX, 2024; CNH, 2023).

Tabla 2.5. Reservas de petróleo crudo equivalente en México (CNH, 2023).

Tabla 3.1. Elementos del subsistema hidráulico. (IINGEN UNAM, 2025).

Tabla 3.2. Elementos del subsistema neumático. (IINGEN UNAM, 2025).

Tabla 3.3. Elementos del subsistema de adquisición. (IINGEN UNAM, 2025).

Tabla 3.4. Elementos del subsistema de pruebas. (IINGEN UNAM, 2025).

Tabla 3.5. Elementos del subsistema de visualización de pruebas. (IINGEN UNAM, 2025).

Tabla 4.1. Matriz experimental de referencia con 25 eventos de la mezcla bifásica líquido-gas.

Tabla 4.2. Velocidades superficiales del flujo bifásico líquido-gas.

Tabla 4.3. Matriz experimental promedio de velocidades superficiales del flujo bifásico líquido-gas.

Tabla 4.4. Verificación del cableado eléctrico con el emulador de corriente.

Tabla 4.5. Configuración del adquirente de señales para los flujos máxicos.

Tabla 4.6. Configuración del adquirente de señales para las presiones P_5 , P_6 , P_7 , y P_8 en los transductores.

Tabla 5.1. Velocidad local de tapones mediante el cálculo de la primera derivada.

Tabla 5.2. Contabilización de tapones y estimación de su frecuencia mediante las gráficas de presión.

Tabla 5.3. Campaña de videograbación de los tapones.

Tabla 5.4. Aproximación a la velocidad local de tapones.

Tabla 5.5. Bandas principales de frecuencias.

Tabla 6.1. Frecuencias referenciales y experimentales.

Tabla 6.2. Frecuencias correlacionales y experimentales.

Tabla 6.3. Aproximación a la velocidad local de tapones.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Estructura orgánica del Sector Energético (SENER, 2023).

Figura 2.2. Cadena de valor del crudo (SENER, 2023).

Figura 2.3. Patrón de flujo estratificado del flujo bifásico en tuberías horizontales en relación con las velocidades superficiales de las fases (Brill J., P., Beggs H., D., 1991).

Figura 2.4. Patrón de flujo intermitente (Brill J., P., Mukherjee, H., 1999).

Figura 3.1. Subsistema hidráulico (IINGEN UNAM, 2025).

Figura 3.2. Subsistema neumático (IINGEN UNAM, 2025).

Figura 3.3. Subsistema de adquisición (IINGEN UNAM, 2025).

Figura 3.4. Subsistema de pruebas (IINGEN UNAM, 2025).

Figura 3.5. Subsistema de visualización de pruebas (IINGEN UNAM, 2025).

Figura 3.6. Diagrama de proceso: circuito experimental del Laboratorio de Flujo Multifásico IINGEN (IINGEN UNAM, 2025).

Figura 4.1. Instrumentación en el subsistema de visualización de pruebas.

Figura 4.2. Conexiones del transductor U 5300. TE Connectivity (2022). TE Connectivity. <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtrv&DocNm=U5300&DocType=Data+Sheet&DocLang=English&DocFormat=pdf&PartCntxt=CAT-PTT0026>.

Figura 4.3. Diagrama de proceso: instalación de transductores de presión.

Figura 4.4. Ruta de trabajo para la instalación de transductores de presión.

Figura 4.5. Ruta de trabajo para la organización de la campaña experimental.

Figura 4.6. Subsistema de adquisición de señales: ejemplo de visualización de archivos “.xls” con los registros de presión obtenidos en el módulo de adquisición.

Figura 5.1. Formación típica de tapones en flujo horizontal de baja viscosidad.

Figura 5.2. Estimación de intervalos de tiempo entre gradientes de presión.

Figura 5.3. Gradientes de presión de la diagonal principal.

Figura 5.4. Filtrado de los gradientes de presión de la diagonal principal.

Figura 5.5. Máximos locales de los gradientes de presión en la diagonal principal.

Figura 5.6. Espectros los primeros gradientes de presión en la diagonal principal de la matriz experimental.

Figura 6.1. Frecuencias referenciales y experimentales.

Figura 6.2. Frecuencias correlaciones y experimentales.

Figura 6.3. Presiones de unidades de tapón y cuerpos de tapón.

Figura 6.4. Velocidades características y frecuencia de formación de los tapones.

Figura 6.5. Velocidades características y gastos máscicos de la matriz experimental.

Figura 6.6. Densidad espectral de potencia en la diagonal principal con gas fijo.

Figura 6.7. Densidad espectral de potencia en la diagonal principal con líquido fijo.

LISTA DE MODELOS MATEMÁTICOS

Modelo 1.1. Densidad API.

Modelo 2.1. Gregory, G. A., Scott, D. S., 1969.

Modelo 2.2. Greskovich, E. J., Shrier, A. L., 1972.

Modelo 2.3. Gregory, G. A., Scott, D. S., 1969. Con la nomenclatura de este texto.

Modelo 2.4. Greskovich, E. J., Shrier, A. L., 1972. Con la nomenclatura de este texto.

Modelo 2.5. Heywood, N. I., Richardson, J. F., 1979.

Modelo 2.6. Nydal, O. J., et al., 1992.

Modelo 2.7. Heywood, N. I., Richardson, J. F., 1979. Con la nomenclatura de este texto.

Modelo 2.8. Nydal, O. J., et al., 1992. Con la nomenclatura de este texto.

Modelo 4.1. Temperatura experimental.

Modelo 4.2. Presión experimental.

Modelo 4.3. Velocidad superficial de la fase líquida (agua).

Modelo 4.4. Densidad del aire.

Modelo 4.5. Velocidad superficial de la fase gaseosa (aire).

Modelo 4.6. Velocidad superficial de la mezcla bifásica líquido-gas.

Modelo 5.1. Gradiente de presión 1.

Modelo 5.2. Gradiente de presión 2.

Modelo 5.3. Velocidad local promedio de los tapones.

Modelo 6.1. Presión de las unidades de tapones.

Modelo 6.2. Presión de los cuerpos de tapones.