

**MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL CAMBIO EN LOS PARÁMETROS DE FLUJO
BIFÁSICO EN UN PATRÓN *SLUG FLOW*, BAJO LA INFLUENCIA DEL CAMPO
GRAVITACIONAL EJERCIDO POR UNA CURVATURA EN EL PLANO
VERTICAL.**

ANDERSON JAVIER ORTIZ PINEDA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL CAMBIO EN LOS PARÁMETROS DE FLUJO
BIFÁSICO EN UN PATRÓN *SLUG FLOW*, BAJO LA INFLUENCIA DEL CAMPO
GRAVITACIONAL EJERCIDO POR UNA CURVATURA EN EL PLANO
VERTICAL.**

ANDERSON JAVIER ORTIZ PINEDA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Directores

DAVID ALFREDO FUENTES DIAZ
Ingeniero Mecánico, PhD.

RICARDO AUGUSTO MAZZA
Ingeniero Mecánico, PhD.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios, por iluminar día a día cada espacio de mi vida.

A mi hermosa madre, por su inmenso amor e imparable dedicación por la familia.

*A mi padre, por sus consejos sabios que me han forjado un camino lleno de
triunfos*

A mis hermanos, por encontrar siempre un buen motivo para sonreírle a la vida.

A mis amigos, por permitirme compartir gratos momentos durante mi formación.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Ricardo Augusto Mazza, por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto bajo su espléndida orientación.

Al profesor David Fuentes, por su participación en mi formación.

A la Universidad Industrial de Santander y todo el personal docente, por inculcarme los valores y conocimientos a lo largo de estos años que me permitieron llegar hasta este punto y cumplir una etapa de mi vida.

Y a todas las personas que hicieron que el desarrollo de este proyecto fuera una gran experiencia, en especial a Maikon Bressani por su gran compañerismo, colaboración y arduo trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
2. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	19
3. OBJETIVOS	21
3.1 OBJETIVO GENERAL	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
4. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	22
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	25
5. MARCO TEÓRICO	32
5.1 FLUJO BIFÁSICO.....	32
5.2 VARIABLES FLUJO BIFÁSICO	34
5.2.1 Liquid Holdup, <i>HL</i> y Gas Void Fraction, α	34
5.2.2 Velocidades Superficiales	35
5.2.3 Velocidad de la Mezcla	35
5.2.4 Velocidad de Deslizamiento	36
5.3 MOVIMIENTO DE BURBUJAS ALARGADAS EN LÍQUIDO ESTANCADO	36
5.3.2 Flujo en tubería Horizontal	37
5.3.3 Efecto de la tensión superficial.....	38
5.3.4 Efecto de la viscosidad.....	38
5.4 MOVIMIENTO DE BURBUJAS ALARGADAS EN LÍQUIDO FLUYENDO.....	39
5. MONTAJE EXPERIMENTAL	41
5. 1 SISTEMA DE SUMINISTRO Y MEDICIÓN DE AGUA.....	43
5.2 SISTEMA DE SUMINISTRO Y MEDICIÓN DE AIRE	45
5.3 ILUMINACIÓN.....	46
5.4 HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN Y ADQUISICIÓN	49

5.4.1 Cámara de alta velocidad	49
5.4.2 Sensor de impedancia	49
6.1 ADQUISICIÓN DE DATOS CON LA SONDA DE IMPEDANCIA	55
6.2 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	58
8. CALCULO VELOCIDAD DEL FRENTE DE LA BURBUJA	62
8.1 CALCULO DE LA VELOCIDAD UTILIZANDO LA SONDA DE IMPEDANCIA	62
8.2 HISTOGRAMAS DE FLUJO DE AMBAS FASES	65
8.3 BURBUJA AISLADA.....	66
8.4 CALCULO DE LA VELOCIDAD DEL FRENTE DE LA BURBUJA CON LAS IMÁGENES DE LA FILMACIÓN RÁPIDA	68
8.4.1 Tramo horizontal y vertical	75
8.4.2 Tramo Curvo.....	77
8 .RESULTADOS Y DISCUSIONES	81
8.1 RESULTADOS BURBUJA AISLADA	81
9. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PRA TRABAJOS FUTUROS.	90
BIBLIOGRAFIA	92
ANEXOS.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Patrones de flujo intermitente en tubería Vertical (I) y Horizontal (II)	32
Figura 2. Mapa de patrones de flujo propuesto por Mandhane et al. [1974]	33
Figura 3. Representación de una célula unitaria del flujo intermitente	34
Figura 4. Montaje Experimental	41
Figura 6. Curva de acrílico	42
Figura 7. Curva de acero	42
Figura 5. Circuito montaje experimental	42
Figura 9. Bomba	44
Figura 8. Tanque de Almacenamiento	44
Figura 11. Flujometro electromagnético	44
Figura 10. Variador de frecuencia	44
Figura 13. Rotámetro	45
Figura 12. Mezclador tipo Y	45
Figura 14. Sistema inyector burbuja aislada	45
Figura 15. - Montaje lámparas de estudio	46
Figura 16. Panel luz continua	46
Figura 17. Panel Led 2PFG	47
Figura 18. Placa controladora y pulsador	47
Figura 19. - Montaje paneles laterales	48
Figura 20. Panel Led laterales	48
Figura 21. - Cámara filmación rápida	49
Figura 22. Representación esquemática del sensor capacitivo de impedancia y su circuito equivalente	50
Figura 24. Placas de calibración y adquisición sensores curva	51
Figura 23. Sondas estación horizontal	51
Figura 25. Mapa de Taitel, Barnea y Duckler (1980)	54
Figura 26. Interfaz de adquisición de señales	55
Figura 27. Señal calibrada para tubería con aire	56

Figura 28. Interfaz durante el proceso de adquisición.....	57
Figura 29. Conexión cámara de filmación rápida.....	58
Figura 30. Menú principal Motion Studio	58
Figura 31. Menú selección cámara	59
Figura 32. Menú abrir módulo de adquisición.....	59
Figura 34. Configuración para sincronización externa	60
Figura 33. Configuración de la frecuencia de adquisición	60
Figura 35. Interfaz programa procesamiento de señales	62
Figura 36. Señal adquirida para $JG = 90, JL = 90$ en Interfaz "Visualiza- Sinal"	63
Figura 37. Histograma velocidad de la burbuja en m/s de la curva	65
Figura 38. Señal de impedancia de una burbuja aislada en la sección vertical	66
Figura 39. Imágenes obtenidas del panel led de luz continua (a) y del panel elaborado por el grupo 2PFG (b).....	68
Figura 41. Representación imagen como superficie.	69
Figura 40. Imagen escala de grises	69
Figura 42. Imagen con sobre segmentación.....	69
Figura 43. Estructura morfológica "disk" de radio 3.....	70
Figura 44. Paso a paso del procesamiento de imágenes para la segmentación. ..	72
Figura 45. Imágenes consecutivas de una burbuja fluyendo en el tramo horizontal.	74
Figura 46. Líneas para determinar la escala ϵ en cm/pixeles	75
Figura 48. Línea centro de nariz (roja) y línea de un punto detrás del frente de la primera imagen de burbuja (azul	76
Figura 47. Área para promedio coordenada del centro	76
Figura 49. Movimiento transversal del frente de nariz en tubería horizontal.....	76
Figura 50. Representación trayectoria arco de curva.....	77
Figura 52. Coordenadas (x,y) del centro del arco y radio medio.....	78
Figura 51. Líneas para determinar la escala ϵ en cm/pixeles	78
Figura 53. Representación del punto del frente de la burbuja en un perfil	79
Figura 54. Representación del desplazamiento transversal de la burbuja	79

Figura 55. Comparación experimental sondas de impedancia-filmación rápida de la velocidad de traslación media de la burbuja.	82
Figura 56. Resultados teórico-experimentales $J_L=30$ y $J_G=60$ [cm/s].....	84
Figura 57. Resultados teórico-experimentales $J_L=60$ y $J_G=30$ [cm/s].....	85
Figura 58. Resultados teórico-experimentales $J_L=90$ y $J_G=90$ [cm/s].....	86
Figura 59. Resultados teórico-experimentales $J_L=90$ y $J_G=90$ [cm/s].....	87
Figura 60. Menú principal herramienta computacional	99
Figura 61. Interfaz sección vertical en configuración de parámetros de escala y frecuencia	101
Figura 62. Interfaz sección vertical para selección de parámetros del filtro	102
Figura 63. Barra indicadora de la evolución del procesamiento de imágenes.	102
Figura 64. Interfaz de resultados burbuja aislada tubería vertical.....	103
Figura 65. Interfaz sección horizontal en configuración de parámetros de escala y frecuencia.	104
Figura 66. Interfaz sección horizontal para selección de parámetros del filtro	104
Figura 67. Interfaz de resultados burbuja aislada tubería horizontal.....	105
Figura 68. Interfaz sección curva en configuración de parámetros de escala y frecuencia	106
Figura 69. Interfaz de la sección curva para selección de parámetros del filtro ...	106
Figura 70. Interfaz de resultados burbuja aislada en la sección curva.....	107

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y Desventajas de diferentes técnicas experimentales de medición en flujos Multifásicos.....	22
Tabla 2.Evaluación de Alternativas	24
Tabla 3. Variables flujo bifásico.	34
Tabla 4. Parámetros de la velocidad de traslación de la burbuja.....	40
Tabla 5. Velocidades superficiales de los puntos analizados para flujo de ambas fases.	53
Tabla 6. Velocidades superficiales del líquido para las pruebas con la burbuja aislada.....	54
Tabla 7. Nomenclatura estaciones y ángulo de ubicación de las sondas de impedancia	64
Tabla 8 Parámetros seleccionados para el procesamiento	73
Tabla 9- Porcentaje diferencia experimental sondas de impedancia-procesamiento de imágenes	83
Tabla 10. Propiedades hidrodinámicas de las fases.	84
Tabla 11. Resultados teórico-experimentales $JL = 30$ y $JG = 60$ [cm/s].....	84
Tabla 12. Resultados teórico-experimentales $JL = 60$ y $JG = 30$ [cm/s]	85
Tabla 13.Resultados teórico-experimentales $JL = 90$ y $JG = 90$ [cm/s].....	86
Tabla 14. Resultados teórico-experimentales $JL = 120$ y $JG = 60$ [cm/s].....	87

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Imágenes del frente de nariz de la burbuja aislada en la curva fluyendo a las velocidades superficiales de la tabla 6.....	94
Anexo B. Imágenes del frente de burbuja y parte trasera para flujo de ambas fases.....	95
Anexo C. Graficas de resultados de la sonda de impedancia $J_L = 90$ y $J_G = 90$	97
Anexo D explicación del funcionamiento de la herramienta computacional para el cálculo de las velocidades del frente de burbuja.....	98

RESUMEN

TITULO: MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL CAMBIO EN LOS PARÁMETROS DE FLUJO BIFÁSICO EN UN PATRÓN *SLUG FLOW*, BAJO LA INFLUENCIA DEL CAMPO GRAVITACIONAL EJERCIDO POR UNA CURVATURA EN EL PLANO VERTICAL*.

AUTOR: ANDERSON JAVIER ORTIZ PINEDA**

PALABRAS CLAVE: Flujo bifásico, Patrón intermitente, Velocidad de burbuja.

El presente trabajo midió la velocidad de traslación de las burbujas de un flujo bifásico de aire y agua en un patrón intermitente o “slug” cuando fluye verticalmente a diferentes tasas volumétricas por una tubería de 26 mm de diámetro interno que se encuentra conectada a una tubería horizontal mediante una curva de 90 grados. Este patrón es caracterizado por el paso alternado de burbujas alargadas de gas y pistones de líquido. Se implementaron como técnicas de medición sensores de impedancia y una cámara de filmación rápida. Dos tipos de curvatura con las mismas dimensiones fueron utilizadas, una en acero y otra en acrílico transparente.

Las mediciones se realizaron en un montaje ubicado en los laboratorios de flujos multifásicos de la Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP) en Brasil. Se utilizó un software elaborado por el grupo de investigación y se desarrolló una herramienta computacional para procesar las imágenes y determinar la velocidad del frente de las burbujas alargadas. Los resultados obtenidos por ambas técnicas de medición fueron comparados y analizados en relación a un modelo teórico.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Directores: PhD Ricardo Augusto Mazza, PhD David Alfredo Fuentes Díaz

ABSTRACT

TITLE: MEASUREMENT AND ANALYSIS OF THE CHANGE IN THE PARAMETERS OF TWO PHASE FLOW IN A SLUG FLOW PATTERN, UNDER THE INFLUENCE OF GRAVITY MADE BY A CURVE IN A VERTICAL PLANE *.

AUTHOR: ANDERSON JAVIER ORTIZ PINEDA**

KEY WORDS: Two-phase Flow, Slug flow, Bubble velocity.

The present work measured the translational velocity of the bubbles of a Slug flow pattern when it flows vertically in different volumetric rates through a 26 mm internal diameter pipe that is connected to a horizontal pipe by a 90 degree curve. This pattern is known for the passage of alternate elongated bubbles and liquid pistons. It was implemented as measurement techniques impedance sensors and High-speed filming. Two types of curve with the same dimensions were used, one of steel and another of transparent acrylic.

The measurements were made in a facility installed at the laboratories of multi-phase flows of the University of Campinas(UNICAMP) in Brazil. It was used a software elaborated for the research group and it was developed a computational tool for image processing and the determination the front velocity of the elongated bubbles. The results obtained by both measurement techniques were compared and analyzed in relation to a math model.

* Work degree

** Faculty of Physical- mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Advisor: PhD. Ricardo Augusto Mazza, PhD. David Alfredo Fuentes Díaz

INTRODUCCIÓN

El estudio de flujos en donde se presenta más de una fase ha sido estudiado por diferentes investigadores desde comienzos de los años 50. Su presencia en diferentes sectores industriales ha motivado la experimentación y el desarrollo de herramientas que permitan conocer su comportamiento hidrodinámico durante seis décadas.

Con la finalidad de fortalecer las competencias de investigación y contribuir en el desarrollo de conocimientos que permitan solucionar los diferentes retos que existen en las industrias de la región, el presente trabajo busca medir las características de un flujo bifásico en un patrón intermitente cuando este fluye por una curvatura de noventa grados utilizando dos técnicas de medición, una de ellas

Los resultados y técnicas aquí presentados, servirán para motivar el estudio de este patrón de flujo en nuestra región e investigar detalladamente el comportamiento del patrón de flujo intermitente en tuberías.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

Los flujos con presencia de más una fase se conocen como flujos multifásicos. Estos ocurren en diferentes sectores industriales, dentro de los cuales resaltan el del petróleo, el químico, el energético (nuclear y geotérmico) y el de la refrigeración. Se presentan en diferentes configuraciones geométricas llamadas patrones de flujo, los cuales se dan en función de la velocidad de cada fase, el gradiente de presión y del diámetro de la tubería y su inclinación.

Entre las posibles configuraciones de distribución espacial de las fases que se pueden presentar en el flujo bifásico, el patrón intermitente de líquido o “slug flow”, caracterizado por el paso alternado de pistones de líquido y burbujas alargadas de gas, es uno de los de mayor presencia en la industria del petróleo. (Matos, 2004).

La demanda energética de los últimos años ha contribuido a que esta industria concentre sus esfuerzos en la búsqueda de nuevos pozos productores, principalmente en aguas profundas, en donde las condiciones de producción son más complejas. La llegada alternada de líquido y burbujas alargadas a las estaciones en donde las fases son separadas y procesadas, genera variación en las presiones de los equipos y causa vibraciones que pueden ocasionar daños en equipos y líneas de tubería, disminución en la eficiencia y pérdidas en la producción. De esta manera, la dificultad que se presenta en las líneas de producción en estos escenarios se hace cada vez mayor, al igual que la demanda de herramientas que permitan conocer el comportamiento del flujo.

A diferencia del flujo de una fase, la determinación de los parámetros de diseño del flujo bifásico, como el coeficiente de transferencia de calor y masa, el

“LiquHoldup^{*}”, el gradiente de presión, entre otros, es una tarea difícil y requiere del conocimiento del comportamiento y la distribución de las fases de la mezcla.

La literatura publicada sobre su comportamiento hidrodinámico principalmente se ha desarrollado sobre el estudio de la burbuja alargada en tuberías verticales, horizontales e inclinadas. Su comportamiento en tuberías de configuraciones diferentes es un campo poco conocido y estudiado por los investigadores.

^{*} Fracción de volumen de líquido ocupado en toda la mezcla.

2. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Debido al amplio campo de acción en el que está presente el flujo bifásico, existe un gran interés por caracterizar y desarrollar modelos para determinar la caída de presión, la transferencia de calor y la distribución de las fases en tuberías de diferentes configuraciones que permitan diseñar equipos más eficientes y controlar y optimizar los procesos.

Por este motivo el grupo de investigación “Two Phase Flow Group (2PFG)” al cual está vinculado este proyecto, trabaja en diferentes estudios que se enfocan en el desarrollo de modelos numéricos para predecir su comportamiento, ya que aunque en la literatura existen varias correlaciones publicadas por diferentes autores para determinar estos parámetros, sus resultados aún no se ajustan con un margen de error aceptable a los valores de los resultados experimentales.

Uno de estos proyectos fue el titulado “Desarrollo de un modelo numérico Slug tracking y drift flux para flujos bifásicos en tuberías”, el cual fue incorporado a un software de modelación que está siendo desarrollado por el grupo de investigación y cuyos resultados motivaron el estudio de este flujo para otras configuraciones.

Con base en lo anterior, implementar un método para simular el patrón de flujo intermitente en una mezcla aire-agua y medir los principales parámetros cuando este fluye en una tubería con un cambio de trayectoria de 90 grados, va a proporcionar la información necesaria para analizar el efecto del cambio en la trayectoria y los flujos volumétricos en el cambio de los parámetros del fluido, y a la vez servirá para validar los modelos numéricos de flujo bifásico que se desarrollan en el grupo de investigación.

En este sentido, se va a contribuir con los esfuerzos del grupo por estudiar el comportamiento del flujo para diferentes configuraciones de transición y con el cumplimiento de sus objetivos en la producción de conocimiento numérico, analítico y experimental. Además se busca motivar el estudio de este tipo de flujo en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander con el fin de generar conocimiento que contribuya al desarrollo y progreso del sector industrial de la región.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Identificar el cambio en los parámetros de flujo bifásico de un patrón *slug flow*, bajo la influencia de una curvatura en el plano vertical.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

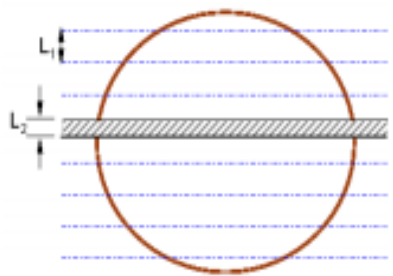
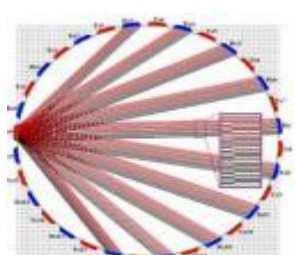
- Determinar la velocidad del frente de burbuja en la entrada, la salida y en la curvatura mediante el análisis de imágenes digitales y la medición de la impedancia del fluido.
- Comparar los resultados experimentales entre los dos instrumentos de medición con un modelo teórico.
- Determinar el efecto del flujo volumétrico de las fases en el cambio de la velocidad del frente de la burbuja.

4. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

El problema puede ser abordado aplicando una metodología numérica (CFD) o experimental. Se escogió para este trabajo un abordaje experimental, puesto que una de las finalidades del proyecto es medir la velocidad de las burbujas y porque el desarrollo experimental sirve como base para verificar y mejorar los modelos numéricos existentes.

La medición de los parámetros del flujo bifásico (Longitud y velocidad de pistones de líquido y burbujas de gas) se pueden realizar implementando diferentes técnicas y herramientas. Para determinar cuál de estas era la más indicada para solucionar este problema, se realizó el siguiente cuadro comparativo con las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Tabla 1. Ventajas y Desventajas de diferentes técnicas experimentales de medición en flujos Multifásicos

ALTERNATIVA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>1.Sensor Óptico</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Poco intrusivo. • Mide fluidos resistivos y capacitivos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ineficaz para medición de fluidos de alta viscosidad. • Alta inversión inicial.
<p>2.Sensor Ultrasónico</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Poco intrusivo • Fácil implementación. • Mide fluidos resistivos y capacitivos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitados a aplicaciones de carácter académico • Alta inversión inicial

<p>3. Anemómetro De Hilo Caliente</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja inversión inicial. • Respuesta de alta frecuencia. • Fácil de implementar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mide solo fluidos Capacitivos. • Altamente intrusivo • Tamaño excesivo. • Calibración con curvas basadas en polinomios de alto orden.
<p>4. Sensor De Impedancia</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja Inversión Inicial • Respuesta rápida • Poco intrusivo • Facilidad de implementación • Mide Fluidos resistivos como capacitivos. 	
<p>5. Cámara de Alta Velocidad</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • No Intrusivo • Captura Ambas fases • Fácil Implementación • Permite observar detalladamente el fenómeno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta inversión Inicial • Métodos de procesamiento complejos.

Para seleccionar la mejor alternativa se tuvo en cuenta los criterios que se muestran en la tabla 2, los cuales que se calificaron de 1 a 5 y se obtuvieron puntajes para cada alternativa.

Tabla 2.Evaluación de Alternativas

Criterios	Ponderación [1-5]	Alternativas [Valor/puntaje]									
		1		2		3		4		5	
Bajo Costo Inicial	4	1	4	1	4	4	16	5	20	1	4
No intrusivo	5	5	20	5	25	4	20	4	20	5	25
Medición de ambas fases	5	5	25	5	25	1	5	5	25	5	25
Fácil implementación	3	2		3	9	4	12	4	12	5	15
Exactitud de medición	5	2	10	3	15	2	10	3	15	4	20
TOTAL	22		65		78		63		92		89

De la tabla se concluye que la mejor alternativa es implementar un sensor de impedancia eléctrica de tipo capacitivo, dado que permite medir el fluido líquido como el de gas, es poco intrusivo y de fácil implementación. Además es un instrumento que fue modelado y desarrollado en el grupo de investigación y del cual se conoce bien su funcionamiento.

Por otra parte, se selecciona la cámara de filmación rápida como segunda alternativa para registrar el paso de las burbujas y pistones de líquido, y determinar la velocidad de traslación de las burbujas alargadas, ya que diferencia de los demás instrumentos de medición, esta permite observar el comportamiento del flujo en su paso por la curvatura y ha demostrado ser de gran utilidad e importancia en el estudio detallado de flujos multifásicos en los últimos años.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los primeros estudios sobre flujo bifásico comenzaron en los años 50 con el objetivo de predecir los patrones de flujo y el desarrollo de correlaciones empíricas para determinar la caída de presión en flujo bifásico en tuberías (Baker, 1954; Flanigan, 1958; Duckler, 1964 y Eaton, 1967)*. Los primeros mapas experimentales publicados fueron para flujo horizontal, la mayoría de ellos en coordenadas dimensionales, como el flujo másico y las velocidades superficiales.

Duckler y Hubbar (1975)* definieron una célula unitaria de longitud L para flujo intermitente y sugirieron un modelo para predecir su comportamiento hidrodinámico en tuberías horizontales, incluyendo longitud, velocidad, Hold Up y distribuciones de presión. Un año más tarde, Taitel y Duckler (1976)* plantearon un modelo para flujo estratificado en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas ($\pm 10^\circ$), y determinaron las regiones de transición entre los diferentes patrones de flujo analizando la estabilidad del flujo en régimen estratificado bajo la hipótesis: Si el flujo era estable, era flujo estratificado, de lo contrario se determinaba el patrón de flujo resultante.

La gran limitación que presentaban los mapas de los autores anteriores estaba en que solo eran aplicables para tamaños de tubería específicos y para los fluidos que habían sido trabajados por los investigadores. Weisman et. al. (1979)* estudió el efecto de las propiedades de los fluidos y del diámetro de la tubería en las transiciones de los patrones de flujo y presentó un mapa funcional para diferentes condiciones de operación y correlaciones adimensionales para los alrededores de las transiciones, eliminando restricción a los mapas anteriores.

*SHOHAM, Ovidia. Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes.: Society of petroleum engineers books committee, 2005. p. 8-16.

Taitel y Barnea (1990)** presentaron un modelo unificado para el patrón intermitente, aplicable para tuberías horizontales, verticales e inclinadas. Paralelamente, Fernandes et al (1983) y Sylvester (1987)* presentaron un modelo detallado para flujo intermitente en tuberías verticales y Shoham(1989)* un procedimiento para su solución. Nickil (1962) presentó correlaciones para determinar la velocidad de ascenso de una burbuja en una tubería vertical con flujo estancado y fluyendo.

La medición de los parámetros del flujo, como la distribución espacial de las fases, velocidad y longitud de los *slugs* permiten determinar entre otros factores, el coeficiente de transferencia de calor y la caída de presión. Razón por la que se han desarrollado diferentes técnicas de medición de tipo: intrusivas y no intrusivas. Su implementación está relacionada al tipo de aplicación y de si el parámetro deseado es una fracción de vacío local o volumétrica promedio (Ismail & Ahmed, 2008) Como ejemplos de métodos intrusivos está la medición por sondas de impedancia y conductancia , rayos-X y tomografía por rayos gamma, transductores de ultrasonido, sensores wire-mesh, tomografía óptica y filmación rápida (Nuryadin, 2015) . Esta última técnica es una herramienta poderosa desde el punto de vista que no obstruye el fluido y es de fácil implementación. Su desventaja está en que su uso es limitado a fluidos transparentes. Aun así, continua siendo una herramienta cada vez más importante en el estudio detallado de flujo multifásicos.

Barbosa(2009) implementó el modelo “slug tracking” presentado por (Rodrigues, 2009) y lo modificó para considerar el efecto producido por el cambio de inclinación (vertical –horizontal) en la acción de la gravedad sobre el fluido y la geometría de la burbuja. Comparó los resultados obtenidos por el modelo con los obtenidos por sondas de impedancia; instrumento de medición consagrado por la

**SHOHAM, Ovadia. Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes.:Society of petroleum engineers books committe, 2005.p. 8-16.

comunidad científica en la medición de los parámetros de flujo bifásico. Se obtuvieron buenos resultados, sin embargo el autor planteó verificar el modelo para otros datos con el fin de buscar falencias en este.

(Gómez, 2010)mostró las diferentes relaciones que existen para determinar de forma teórica los parámetros de flujo para diferentes inclinaciones de la tubería, así mismo determinó que el modelo propuesto por Bendiksen (1984) da los mejores resultados. Encontró que para una misma inclinación de la tubería y una misma velocidad de la mezcla ($J_G + J_L = c$) existen dos velocidades diferentes para el frente de la burbuja, atribuidas al cambio en el número de burbujas dispersas en el pistón de líquido. Finalmente, plantea implementar la captura de imágenes en el pistón de líquido para medir la fracción de vacío en este y obtener mejores resultados.

(Souza, 2013) presentó la comparación de los resultados de tres modelos teóricos con los datos experimentales, de los cuales el modelo propuesto por Guet et al. (2006) dio una concordancia con un error absoluto no mayor de 0,03. Presenta también la fabricación y el funcionamiento de un sensor de impedancia capacitivo y uno de impedancia de anillos, además del procedimiento para determinar la fracción de vacío transversal con la sonda de impedancia eléctrica.

El estudio de movimiento de burbujas alargadas de gas utilizando la técnica de procesamiento de imágenes ha sido desarrollado por diferentes autores en diferentes configuraciones de tubería. Entre algunos de estos estudios se encuentran los que se muestran a continuación.

(Dinht, Kim, & Choi, 1999) desarrollaron un algoritmo que seguía y almacenaba las coordenadas de cualquier punto en una imagen sobre una pantalla que era seleccionado por un cursor controlado por un mouse manualmente. Determinaba

la velocidad y los perfiles de vacío en la sección transversal de la tubería en un flujo intermitente.

(Barnea, 1999) procesó y analizó las imágenes digitales consecutivas de una filmación para determinar la forma de las burbujas alargadas y las interfaces liquido-gas para diferentes condiciones de flujo. Demostró el carácter resonante de la parte trasera de la burbuja. Demostró que la amplitud de la frecuencia de oscilación de la parte trasera incrementa rápidamente con la longitud de la burbuja como con la velocidad del líquido. Enfatizó la importancia de conocer el campo de velocidades detrás de la burbuja de Taylor.

(Van Hout, Barnea, & Shemer, 2002) determinó las velocidades y longitudes de las burbujas alargadas en una tubería horizontal e inclinada utilizando sensores de fibra óptica y procesamiento de imágenes. Los resultados fueron comparados con la correlación empírica dada por Nicklin et al. (1962) obteniendo aproximaciones aceptables para inclinaciones de tubería inferior a 20° y una discrepancia hasta del 50% para ángulos superiores. Sugirió que el error se debía a que el modelo no tenía en cuenta las burbujas dispersas que eran absorbidas por las burbujas alargadas que se propagaban, lo que hacía que su volumen y velocidad se incrementará. Presentó un modelo cuyos resultados se encontraban dentro del 15 % de las velocidades de traslación medidas.

(Mayor, Pinto, & Campos, 2007) estudió el flujo en una tubería vertical mediante filtrado y procesamiento de imágenes obteniendo los parámetros de velocidad y longitud de la burbuja y del pistón de líquido, con una incertidumbre de 5%, 2.5 y 7%, respectivamente, demostrando la viabilidad y futura implementación de la técnica de procesamiento de imágenes en el estudio de las características del flujo intermitente.

Fonseca Roberto (2009) realizó un estudio en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas para determinar los campos de velocidad instantánea en la película de líquido, nariz y parte trasera de la burbuja. Implementó tres técnicas ópticas no invasivas: PIV (Particle Image Velocimetry), LIF (Laser Induced Fluorescence) para eliminar la luz verde proveniente de la técnica PIV y PST (Pulsed Shadow Technique) para aumentar el contraste de las interfaces líquido-aire. Esta última consiste en aplicar una luz monocromática en el fondo de la sección de prueba que al pasar por la zona de interface es atenuada y crea una sombra en las zonas cerca a la interface sobre la fase gaseosa. Los resultados permitieron constatar que la burbuja tiende a presentar su nariz hacia el centro de la tubería conforme se aumenta la velocidad de mezcla.

Walace (2012) desarrolló unas rutinas para determinar la velocidad del frente y la parte trasera de la burbuja en un flujo intermitente en una tubería horizontal cuando se presentaba una intensa cantidad de burbujas dispersas. Implementó un sensor wire mesh y la técnica PST (Pulsed Shadow Technique) utilizada por Fonseca (2009). El procesamiento de imágenes automático se vio limitado por la gran cantidad de burbujas dispersas que se presentaba al incrementar el flujo de aire, por lo que el autor presentó una interfaz en la cual el usuario determinaba visualmente el frente y la parte trasera de la burbuja y posteriormente determinaba la velocidad y longitud de la burbuja. Analizó también la influencia del número de *Froud* en la forma del perfil de la nariz y el espesor de la película de líquido.

G. Manfredo (2012) identificó los patrones de flujo mediante un análisis de la densidad de la fase en las imágenes. Elogió su técnica en relación a la poca cantidad de señales requeridas para determinar el patrón de flujo comparada con otras técnicas basadas en diferentes tipos de transformadas.

C.E.F. do Amaral (2013) presentó una nueva técnica de procesamiento de imágenes para determinar la velocidad, frecuencia y longitud de los pistones de líquido en tubería horizontal. Los resultados fueron comparados con los modelos teóricos, dando resultados que demostraron la gran utilidad de la técnica desarrollada y resaltando su importancia en el estudio del flujo multifásicos.

En razón a que la mayoría de estudios fueron desarrollados para flujo en tubería vertical, horizontal y ligeramente inclinada, la falta de información en tuberías con otras configuraciones motivó el desarrollo de nuevos estudios.

Barbosa (2010) utilizó un modelo lagrangiano de seguimiento de pistones o *Slug Tracking* desarrollado por Rodríguez (2009), para capturar las alteraciones de las características de los pistones y de las burbujas durante la transición vertical para horizontal. Los resultados de este trabajo despertaron el interés por conocer la variación de los parámetros del flujo en la zona de curvatura.

Mazza (2012) presentó un estudio experimental de flujo intermitente en una transición vertical ascendente horizontal utilizando una cámara de alta velocidad y sensores capacitivos. Los resultados obtenidos por la cámara y los sensores fueron comparados con los resultados obtenidos experimentalmente por Gómez (2009). El error obtenido del procedimiento con las imágenes fue atribuido al pequeño espacio de muestreo, mientras el método con sondas de impedancia utilizaba 200 burbujas para hacer el cálculo promedio de los parámetros, la técnica de imágenes utilizó 10. Finalmente, el autor resalta la flexibilidad que tiene la cámara como instrumento de medición y plantea desarrollar nuevos experimentos en donde se pueda incrementar el número de burbujas para alcanzar una distribución normal de las medidas, para lo cual es necesario el desarrollo de técnicas más eficientes para el análisis de la velocidad de la burbuja.

Motivado y basado en lo anterior, el presente trabajo utiliza la medición con sondas de impedancia y el procesamiento de imágenes para determinar la velocidad del frente de la burbuja en la transición vertical-ascendente horizontal y comparar la técnica consagrada para la medición de flujos bifásicos con una técnica que ha mostrado ser útil en el estudio detallado de flujos bifásicos y que aún tiene campo por estudiar.

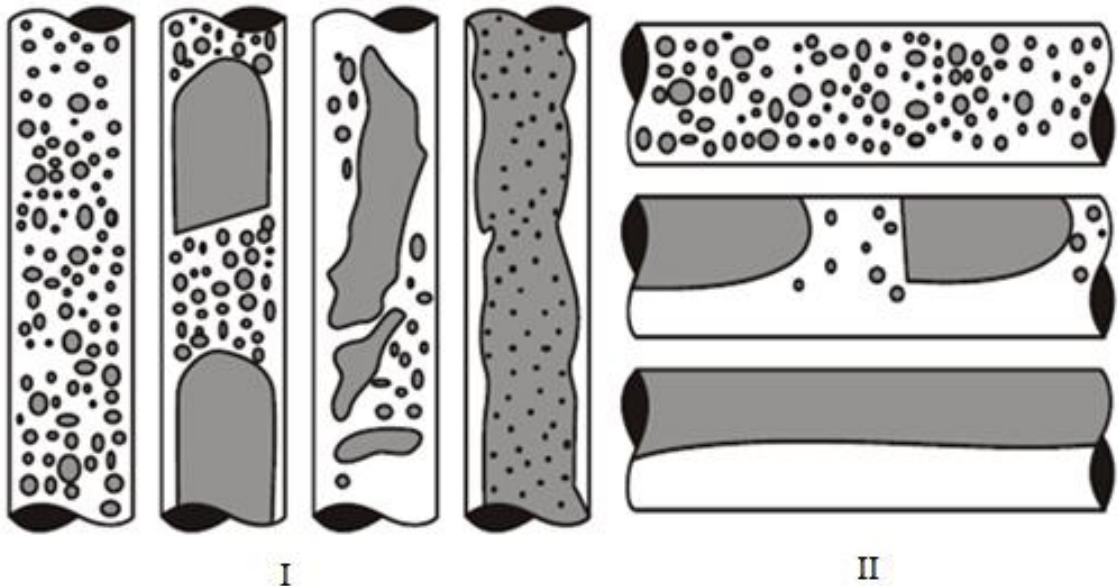
5. MARCO TEÓRICO

5.1 FLUJO BIFÁSICO

El flujo bifásico se presenta en sistemas donde hay flujo de dos fases. Se pueden clasificar de acuerdo al estado de las fases: líquido-sólido, líquido-gas, gas-sólido; generalmente ocurre en sistemas que presentan una mezcla de una fase líquida y una gaseosa.

De acuerdo a la velocidad de cada fase, la inclinación de la tubería y el gradiente de presión, el flujo presenta una distribución geométrica característica de las fases que es conocida como patrón de flujo. La figura 1 representa los patrones de flujo bifásico en tubería vertical y horizontal.

Figura 1. Patrones de flujo intermitente en tubería Vertical (I) y Horizontal (II)

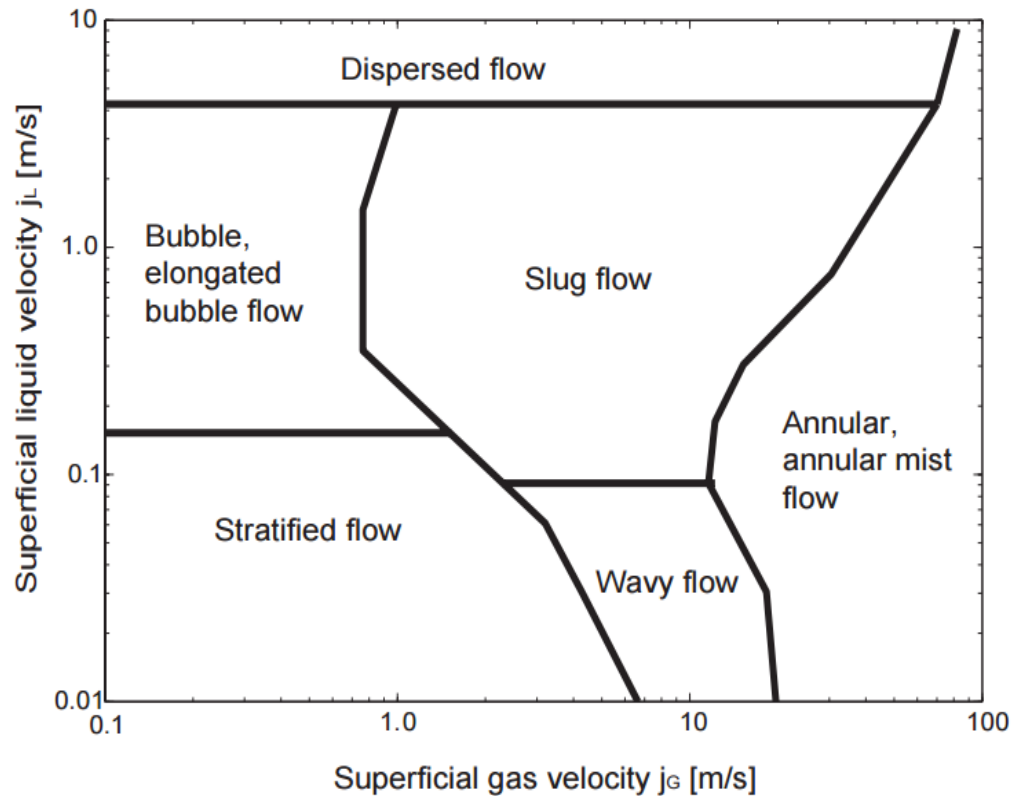


Fuente: Rodríguez (2009).

Estos patrones están identificados en mapas de patrones de flujo como el propuesto por Mandhane et al. (1974) que se muestra en la figura 2. Dentro de los diferentes patrones de flujo, el patrón de flujo intermitente se caracteriza por el paso alternado de burbujas alargadas de gas y pistones de líquido que contienen

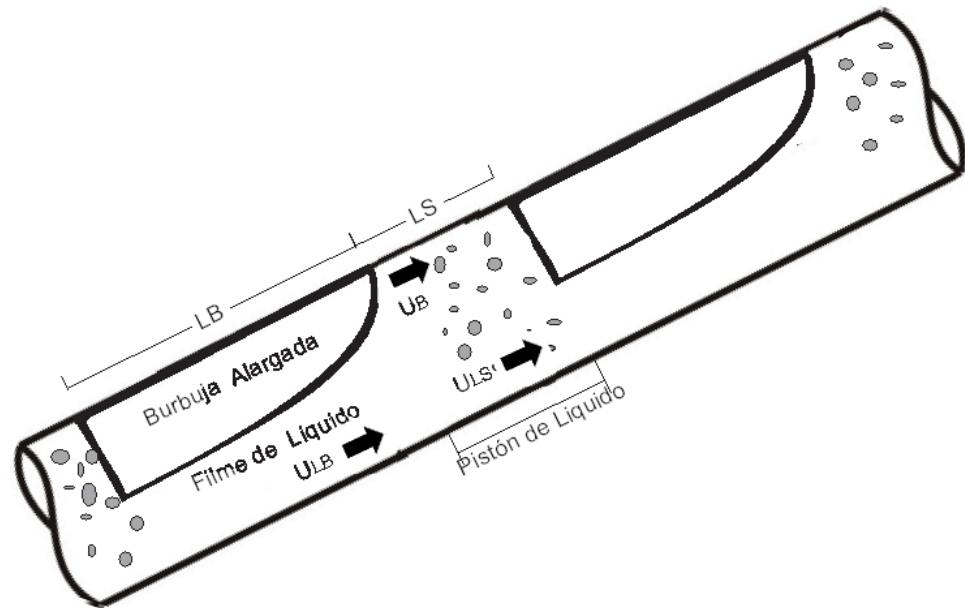
burbujas de gas dispersas. La burbuja alargada de gas fluye por una región llamada filme, la cual se considera libre de burbujas dispersas. La figura 3 representa las regiones que conforman la célula unitaria de un flujo intermitente.

Figura 2. Mapa de patrones de flujo propuesto por Mandhane et al. [1974]



Una de las características más importantes de este patrón de flujo es que las longitudes de las burbujas alargadas y de los pistones de líquido son inestables, incluso cuando los flujos volumétricos de ambas fases se mantienen constantes en la entrada de la tubería.

Figura 3. Representación de una célula unitaria del flujo intermitente.



5.2 VARIABLES FLUJO BIFÁSICO

Tabla 3. Variables flujo bifásico.

Flujo Volumétrico de líquido (m^3/s)	q_L
Flujo Volumétrico de gas (m^3/s)	q_G
Flujo Volumétrico de la mezcla (m^3/s)	$q = q_L + q_G$
Flujo másico de líquido (Kg/s)	W_L
Flujo masico de gas (Kg/s)	W_G
Flujo masico total (Kg/s)	W

5.2.1 Liquid Holdup, H_L y Gas Void Fraction, α

El líquido Holdup H_L es la fracción de volumen de líquido ocupado en toda la mezcla. De la misma forma, el gas void fraction α es la fracción de volumen de fase gaseosa ocupado en la mezcla bifásica. Por lo anterior $H_L + \alpha = 1$.

EL liquid Holdup instantáneo medido en un volumen diferencial en un espacio $H_L(r,t)$ podría ser 1 o 0 para el caso cuando el volumen medio sea muy pequeño. La relación para determinar el valor promedio en función del tiempo para un determinado punto local está dada por.

$$\int H_L = \frac{\iint H_L(r,t) dr dt}{\int dr \int dt} \quad (1)$$

Puede ser medido en el área transversal o en un volumen dado. Para el último caso está dado por la relación entra las longitudes ocupadas por cada fase como si cada una ocupara toda el área transversal en una determinada longitud

5.2.2 Velocidades Superficiales

La velocidad superficial se refiere a la velocidad a la que se desplaza cada fase en la tubería como si estuviera sola.

Velocidad Superficial de Liquido, $V_{SL} = q_L/A_p$ [m/s]

Velocidad Superficial de Gas, $V_{SG} = q_G/A_p$ [m/s]

5.2.3 Velocidad de la Mezcla

Está dada por el flujo volumétrico de la mezcla por unidad de área.

$$V_M = \frac{q_L+q_G}{A_p} = V_{SL} + V_{SG} \quad [m/s]$$

En la realidad, cada fase no ocupa toda la sección transversal de la tubería, sino una fracción. Por lo tanto, la velocidad calculada anteriormente no es la velocidad real a la que se desplaza la fase. La velocidad real se denomina velocidad actual y tiene en cuenta el Liquid HoldUp para corregir el área transversal de flujo.

$$V_L = \frac{q_L}{A_L} = \frac{V_{SL}}{H_L} \text{ y } V_G = \frac{q_G}{A_G} = \frac{V_{SG}}{1-H_L} \quad (2)$$

5.2.4 Velocidad de Deslizamiento

La velocidad de deslizamiento de cada fase es la velocidad de cada fase relativa a una superficie moviéndose a la velocidad de la mezcla.

$$V_{DL} = V_L - V_M \text{ [m/s]}$$

$$V_{DG} = V_G - V_M \text{ [m/s]}$$

5.2.5 Calidad

Es la razón entre el flujo másico de gas y el flujo másico de la mezcla.

$$X = \frac{W_G}{W_G + W_L} = \frac{W_G}{W} \quad (3)$$

5.3 MOVIMIENTO DE BURBUJAS ALARGADAS EN LÍQUIDO ESTANCADO

La velocidad de una burbuja alargada moviéndose en una tubería de diámetro D en líquido estancado, también conocida como velocidad de deslizamiento o "Drift Velocity", fue estudiada inicialmente por Dumitrescu (1943)* y Davies and Taylor (1949)*. Sus trabajos mostraron que la velocidad de la burbuja está dada por una relación proporcional a la raíz cuadrada del producto del diámetro de la tubería por la gravedad.

$$V_\infty = C_\infty * \sqrt{g' * D} \quad (4)$$

* * SHOHAM, Ovadia. Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes.:Society of petroleum engineers books committe, 2005.p. 8-16.

Donde C_∞ es el coeficiente de distribución y es función de tres números adimensionales independientes.

$$C_\infty = C_\infty(N_f, E_o, \theta) \quad (5)$$

Donde,

- $N_f = D^3/2g^{1/2}/\nu L$ es la división entre el número de Froude y el número de Reynolds
- $E_o = \rho L g D^2 / \sigma$ es el número de Eötvös . Es la razón entre la fuerza de gravedad y los esfuerzos superficiales.

5.3.1 Flujo en tubería Vertical

La relación propuesta se desarrolló para el caso cuando $E_o < 100$ y el diámetro de la tubería satisface la relación $D > 10(\sigma/\rho L g^*)^{1/2}$.

Dumitrescu (1943)*^{*} obtuvo el primer resultado de C_∞ con un valor de 0,351. EL trabajo de Davies y Taylor (1949)*^{*} determinó un valor de 0,328 para C_∞ en flujo vertical. En la actualidad el valor ampliamente aceptado es de 0,345.

5.3.2 Flujo en tubería Horizontal

El valor de C_∞ considerado para flujo horizontal es de 0,54. EL cual fue determinado por Bendiksen (1984) e Weber et al. (1986)

* * SHOHAM, Ovadia. Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes.:Society of petroleum engineers books committe, 2005.p. 8-16.

5.3.3 Efecto de la tensión superficial

Wallis(1969) presentó una correlación entre diferentes modelos propuestos por autores anteriores para flujo vertical.

$$C_{\infty}^V(\infty, E_o; 90^{\circ}) = 0,369 \sqrt{1 - \frac{6,94}{E_o}} \quad (6)$$

Weber (1981) propuso una relación donde la velocidad de deslizamiento en flujo horizontal decrece a medida que la tensión superficial incrementa.

$$C_{\infty}^H(\infty, E_o; 0^{\circ}) = 0,54 - 1,76E_o^{-0,56} \quad (7)$$

5.3.4 Efecto de la viscosidad

El efecto generado por la viscosidad en la velocidad de ascenso es expresado por Waliis (1969) como:

$$C_{\infty}(N_f, \infty; 90^{\circ}) = 0,345(1 - e_t^{0,01 N_f}) \quad (8)$$

5.3.5 Efecto de la Inclinación

El efecto de la inclinación fue estudiado por diferentes autores para un rango de inclinaciones de 0 a 90° en diferentes tipos de mezclas.

Bendiksen(1984) presentó una relación general basada en las contribuciones de velocidad de deslizamiento en la vertical y en la horizontal.

$$C_{\infty}(\theta) = C(0^{\circ}) \cos(\theta) + C(90^{\circ}) \sin(\theta) \quad (9)$$

5.4 MOVIMIENTO DE BURBUJAS ALARGADAS EN LÍQUIDO FLUYENDO

Nicklin(1962) propuso una combinación lineal de dos términos(ecuación 10). Para determinar la velocidad de las burbujas alargadas. El primer término da la contribución dada por la velocidad de la mezcla U_M y el segundo por la velocidad de la burbuja alargada en líquido estancado V_∞ (explicada en la sección anterior).

$$V = C_o U_M + C_\infty * \sqrt{g * D} \quad (20)$$

Donde C_o es el parámetro de distribución que depende de la velocidad de la Mezcla U_M a través de otros parámetros del flujo como el número de Reynolds, Weber y Froud. C_o es definido como la razón entre las velocidades media y máxima del líquido en la tubería.

$$C_o = \frac{U_{M\acute{a}x}}{U} \quad (13)$$

Bendiksen (1984) propuso un valor de C_o de 1,2 para régimen turbulento ($Re_M \geq 2000$) en tubería horizontal y un C_o de 2 para régimen laminar ($R < 2000$). Para flujo en tubería vertical el valor de C_o propuesto fue de 1,2. Planteó también una relación para determinar el valor de C_o en función del ángulo de inclinación de la tubería.

$$\begin{aligned} \text{Si } F_r \leq 3,5 & \quad C_o = C_o^H + (C_o^V - C_o^H)\sin(\theta)^2 \\ F_r > 3,5 & \quad C_o = C_o^V \end{aligned} \quad (42)$$

Una vez definidas las expresiones para determinar el coeficiente de distribución C_o y la velocidad de deslizamiento C_∞ , se presenta a continuación una tabla publicada por Mazza(2010) basada en el trabajo de Bendiksen(1984) para determinar el C_∞ y C_o de forma general donde se incluyen y se consideran los

efectos de la viscosidad, el ángulo de inclinación , la fuerzas de tensión superficial, y un factor de corrección de tensión superficial .

Tabla 4. Parámetros de la velocidad de traslación de la burbuja.

		C_o	C_∞
$Re_M \geq 2000$	$Fr_M \geq 3,5$	1,2	$\frac{0,345}{\left(1 + \frac{3805}{E_o^{3,06}}\right)^{0,58}} \sin(\theta)$
	$Fr_M < 3,5$	$1,0+0,2 \sin^2(\theta)$	$\left(0,542 - \frac{1,76}{E_o^{0,56}}\right) \cos(\theta) + \frac{0,345}{\left(1 + \frac{3805}{E_o^{3,06}}\right)^{0,58}} \sin(\theta)$
$Re_M < 2000$		2,0	$\left(0,542 - \frac{1,76}{E_o^{0,56}}\right) \cos(\theta) + \frac{0,345}{\left(1 + \frac{3805}{E_o^{3,06}}\right)^{0,58}} \sin(\theta)$
Donde	$Re_M = \frac{\rho_L u_{MD}}{\mu_L}$	$Fr_M = \frac{u_M}{\sqrt{gD}}$	$E_o = \frac{(\rho_L - \rho_G) g D^2}{\sigma}$

Fuente: Mazza, R. a. (2010)

5. MONTAJE EXPERIMENTAL

El montaje experimental se encuentra instalado en el Laboratorio de 2PFG (Two Phase Flow Group) del Departamento de Energía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Estatal de Campinas.

Los experimentos han sido desarrollados en el montaje mostrado en la figura 4, el cual está dividido en tres circuitos, uno para el suministro de agua, otro para el aire y un último donde fluye la mezcla bifásica. Los dos primeros circuitos se unen por medio de un mezclador tipo "Y" (figura 13) que forma el flujo bifásico. El montaje se compone de una tubería de acero vertical de 2.2 m unida a una tubería de acero horizontal de 1.2 m a través de una curva de 90°. La curva tiene un diámetro interno de 26 mm y un radio de curvatura interno de 129 mm. Dos tipos de curvatura con las mismas dimensiones son utilizadas, una en acero y otra en acrílico transparente. La primera cuenta con cinco sensores de impedancia separados 15° entre ellos que conforman cuatro estaciones de medición (Figura 7).

Figura 4. Montaje Experimental



Figura 7. Circuito montaje experimental

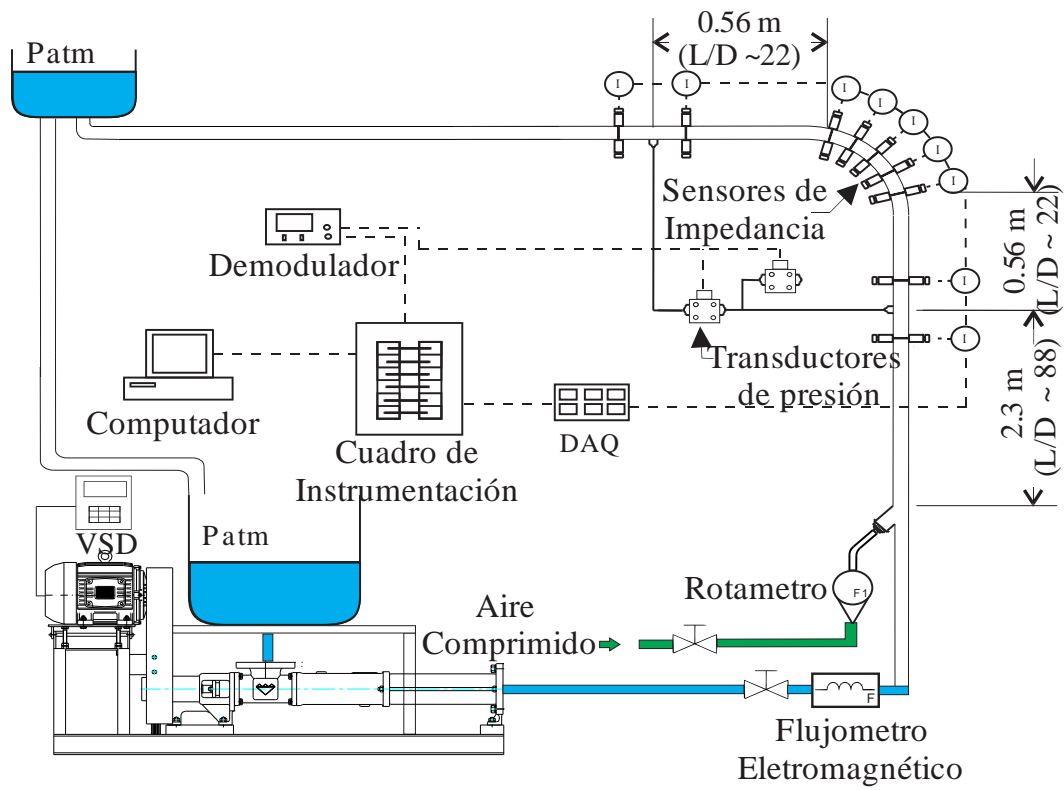


Figura 5. Curva de acrílico.

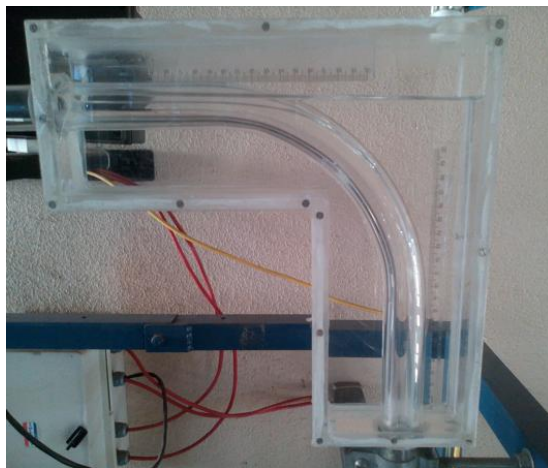


Figura 6. Curva de acero.



La curva de acrílico transparente (figura 6) es utilizada para capturar las imágenes de las burbujas y se encuentra sumergida en un acuario rectangular del mismo material, cuyo propósito es disminuir la distorsión en las imágenes producto de la curvatura de la tubería y de la refracción de la luz. Dependiendo de la posición de la cámara, esta curva permite también hacer las mediciones para la sección horizontal y vertical. Dos reglas ubicadas dentro del acuario facilitan la medición de la escala ε en pixeles por unidad de longitud.

La medición en la sección vertical y horizontal se realiza con dos estaciones implementadas con sensores de impedancia separados 112 mm entre sí, ubicadas a 22D del inicio y fin de la curva, es decir a 0,56 metros en la vertical y horizontal respectivamente. En la figura 5 se observan las seis estaciones de medición de impedancia.

Las pruebas se realizan en el mismo montaje, por lo que las pruebas son realizadas separadamente para cada tipo de curva.

5. 1 SISTEMA DE SUMINISTRO Y MEDICIÓN DE AGUA

Este sistema se compone por un tanque de almacenamiento de agua de 1 m³ (figura 8) que se encuentra conectado a través de una línea a una bomba centrífuga modelo 2WHT (figura 9) fabricada por la empresa Weatherford que hace fluir el agua a través del circuito. Un medidor electromagnético ubicado en la línea de la salida de la bomba marca KROHNE, modelo Optiflux 2010 C (figura 11), con capacidad para medir 20 m³/h mide el flujo volumétrico con una incertidumbre de 0,5%.

Figura 8. Tanque de Almacenamiento



Figura 9. Bomba



Un variador de frecuencia de la empresa TECMOT (figura 10), modelo Delta VFD-B es utilizado para controlar remotamente el flujo volumétrico bombeado por la bomba. Una válvula de Bypass es utilizada por motivos de seguridad y para ayudar a regular el flujo volumétrico de suministro en línea de prueba.

Figura 11. Variador de frecuencia



Figura 10. Flujojetro electromagnético



5.2 SISTEMA DE SUMINISTRO Y MEDICIÓN DE AIRE

Este sistema se alimenta por una línea que proviene de una estación que suministra aire presurizado a diferentes puntos de la facultad. Un rotámetro marca Omega, modelo FL4200 (figura 12), con capacidad para medir flujo en el rango de 15 SCFH hasta 100 SCFH, mide el flujo de aire suministrado en el sistema. El aire es inyectado en la línea vertical a través de un mezclador tipo Y (Figura 13).

Figura 12. Rotámetro



Figura 13. Mezclador tipo Y



Un sistema de dos válvulas (figura 14) se utiliza para inyectar la burbuja para hacer las mediciones con la burbuja aislada.

Figura 14. Sistema inyector burbuja aislada



5.3 ILUMINACIÓN.

Dos lámparas de estudio (figura 15) ubicadas en la parte frontal del sistema mejoran la iluminación y ayudan a eliminar sombras que puedan afectar la calidad de la imagen.

Figura 15. - Montaje lámparas de estudio



5.3.1 Lámparas Led: Posterior y Laterales

Ubicado detrás del acuario y separado por una hoja de papel mantequilla, un panel led de alta intensidad marca Aputure Amaram modelo AL-528W (figura 16) con potencia de 30W y alimentación DC a 18 V genera una luz continua que proporciona la iluminación requerida por el lente de la cámara para capturar las imágenes con alta calidad.

Figura 16. Panel luz continua



Como otra alternativa para capturar las imágenes, se utiliza un panel elaborado por el grupo 2PFG que se sincroniza con la frecuencia de adquisición de las imágenes, el cual genera una iluminación a máxima potencia a la misma frecuencia en que se capturan las imágenes. El panel funciona enviando la corriente máxima que puede recibir el led (sin que se queme) en un instante de tiempo muy pequeño, de modo que la iluminación sea la máxima que el led puede emitir. La frecuencia máxima de sincronización del panel es de 455 Hz y es controlado mediante una placa y un pulsador o “Trigger”.

Figura 17. Panel Led 2PFG



Figura 18. Placa controladora y pulsador.



Ambos paneles juegan un papel fundamental en la captura de imágenes, ya que al tener una frecuencia de adquisición de imágenes muy alta y un tiempo de apertura del obturador (equivalente al tiempo que la luz reside sobre el lente digital) muy bajo (250us), la cantidad de luz que debe recibir el sensor debe ser la necesaria para garantizar una exposición correcta.

Cada panel, tanto el Aputure como el elaborado por el grupo investigación se utilizan en pruebas diferentes para comparar cuál de los dos da las imágenes con mayor claridad y hace más fácil el procesamiento.

De igual forma, dos paneles de leds (figura 19) ubicados paralelamente a la sección de prueba (figura 20) y separados por una hoja de papel mantequilla, mejoran la iluminación en la captura de las imágenes.

El papel mantequilla es utilizado para difuminar y suavizar la luz puntual de los leds. Elimina el brillo y sombras fuertes, replicando la iluminación producida por la luz natural.

Figura 20. Panel Led laterales



Figura 19. - Montaje paneles laterales



5.4 HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN Y ADQUISICIÓN

5.4.1 Cámara de alta velocidad

Una cámara Nikon modelo MotionXtraN3, (figura 21), con capacidad para capturar 1000 cuadros por segundo (fps) a una resolución de 1280 por 1024 píxeles captura las imágenes del flujo en la transición vertical–horizontal. La cámara es sincronizada con el software Motion Studio para adquirir las imágenes.

Figura 21. - Cámara filmación rápida



5.4.2 Sensor de impedancia

Definición Impedancia:

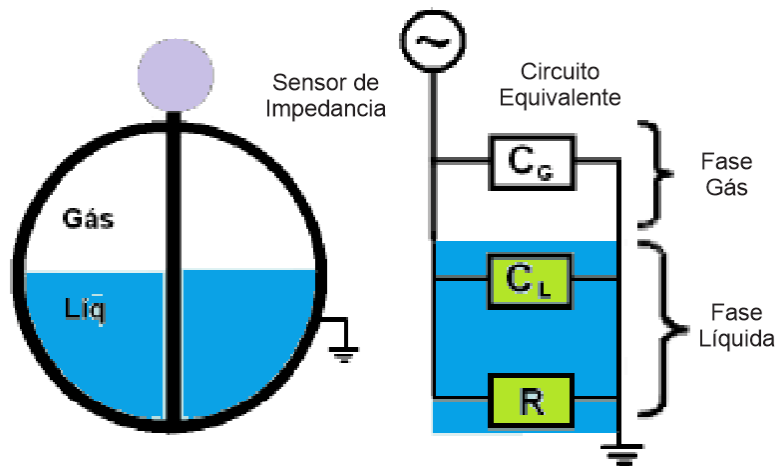
Representada por Z , es la medida de la oposición de un circuito eléctrico al flujo de corriente alterna/directa. Es un vector de dos componentes (resistencia y reactancia) que posee tanto magnitud como fase. Donde la reactancia es la oposición generada al paso de corriente alterna por causa de la capacitancia o la inductancia. La relación para determinar Z esta dada por:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\omega C \quad (13)$$

Principio de funcionamiento

Su principio de funcionamiento se basa en la medición de la capacitancia del flujo en el área transversal del tubo por medio de un asta metálica, conocida como electrodo. El asta se encuentra aislada en sus extremos y hace contacto con el tubo a través del medio que se encuentra en la tubería, es decir con el volumen de las fases presentes en la sección transversal. El tubo está conectado a tierra y el asta metálica es excitada por una fuente externa que genera un circuito eléctrico como se muestra en la figura 22.

Figura 22. Representación esquemática del sensor capacitivo de impedancia y su circuito equivalente



. Fuente: E. Rosa

La suma de la resistencia de cada medio compone la impedancia total del circuito. El aire (fase gaseosa) contribuye con una capacitancia C_G y el agua por ser resistiva contribuye con una componente resistiva R y una capacitiva C_L . Donde:

$$C = C_G + C_L \quad (14)$$

El contacto de las fases con el hasta metálica es detectada por los cambios en la constante dieléctrica del medio. La linealidad de la señal depende del contenido de fase sumergido en el electrodo y de la configuración, generalmente esta señal es lineal. La señal es calibrada y adquirida por un circuito de adecuación de señal (figura 24) que procesa la señal de acuerdo a las relaciones presentadas por Mastelari (2005), que la convierte a una señal de 1 a 5 V y la envía a una tarjeta de adquisición de datos. Una señal de 1 V significa que solo está presente la fase gaseosa, un valor de 5 V significa que la hasta está totalmente sumergida en líquido y valores intermedios significan presencia de las dos fases en contacto con la sonda.

La figura 23 muestra las dos sondas de impedancia de la sección horizontal junto con las dos placas de calibración y adquisición.

Figura 24. Sondas estación horizontal



Figura 23. Placas de calibración y adquisición sensores curva



Las señales de impedancia son adquiridas y almacenadas por un módulo de Lab View para su posterior procesamiento. El software de adquisición de datos, como el de procesamiento están desarrollados en la plataforma Lab View de National Instruments.

FACTOR DE CORTE

Es una fracción entre el valor máximo (5V) y el mínimo (1 V) de la señal que se utiliza para definir los intervalos de los valores que van ser considerados como fase líquida o gaseosa.

$$0 \geq F_{corte} \leq 1$$

$$X \leq (V_{max} - V_{min}) * F_{corte} \quad \text{Fase Gás}$$

$$X \geq (V_{max} - V_{min}) * F_{corte} \quad \text{Fase Líquida}$$

Este factor convierte la señal adquirida en una señal cuadrada que se utiliza para determinar la velocidad y longitud de los pistones de líquido y de las burbujas alargadas de gas.

6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las pruebas se realizan para dos casos de estudio diferentes, el primero para cuando existe velocidad de ambas fases de la mezcla, es decir que tanto el líquido como el gas tiene flujos volumétricos en la tubería, y el segundo para cuando se libera una burbuja aislada en la tubería cuando tiene líquido en movimiento. Para ambos casos se utilizan los dos instrumentos de medición y los dos tipos de curvatura que se mencionaron en el capítulo 5.

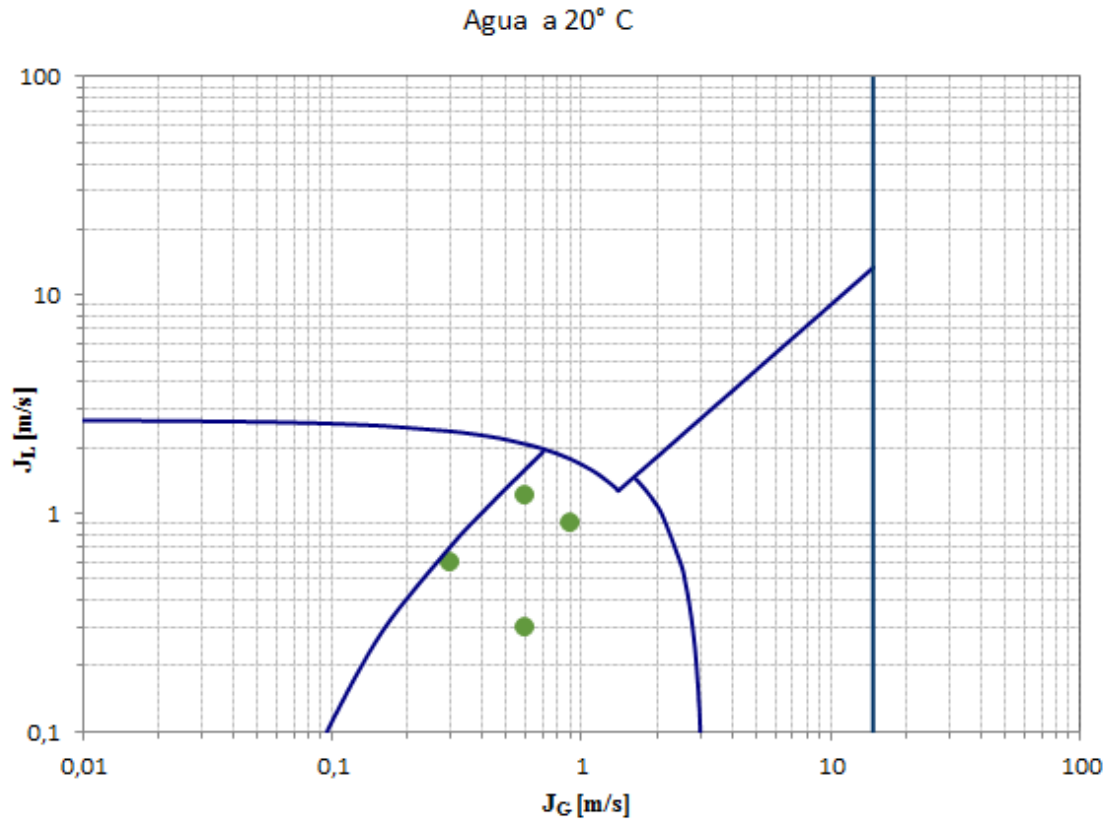
Las velocidades de los puntos analizados para el caso de flujo de ambas fases se muestran en la tabla 5. Los valores nominales representan las velocidades de las fases deseadas a presión atmosférica; los valores corregidos son los valores reales de la velocidad del gas a la presión de la línea vertical. Las mediciones se realizaron tres veces para cada punto de análisis con el fin de tener una muestra mínima estadística.

Tabla 5. Velocidades superficiales de los puntos analizados para flujo de ambas fases.

Punto N°.	Sensor de Impedancia	Filmación Rápida	$J_L^{Nominal}$ [$\frac{cm}{s}$]	$J_G^{Nominal}$ [$\frac{cm}{s}$]	$J_L^{Corregida}$ [$\frac{cm}{s}$]	$J_G^{Corregida}$ [$\frac{cm}{s}$]
1	✓	✓	30	60	30	63
2	✓	✓	60	30	60	30
3	✓	✓	90	90	90	89
4	✓	✓	120	60	120	55

Los puntos son representados en el mapa de patrones vertical en la figura 25 propuesto por Taitel et al.(1980). De acuerdo al mapa se puede verificar que todos los puntos de medición corresponden al patrón intermitente y se garantiza flujo intermitente en la línea de prueba.

Figura 25. Mapa de Taitel, Barnea y Duckler (1980)



El montaje experimental usado para la burbuja aislada es el mismo que fue usado para el estudio del flujo intermitente, con la diferencia de que se utilizó el sistema de dos válvulas mostrado en la figura 14 para inyectar la burbuja de aire al sistema. La tabla 6 muestra los puntos analizados para la burbuja aislada.

Tabla 6. Velocidades superficiales del líquido para las pruebas con la burbuja aislada.

Punto N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sensor de Impedancia	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Filmación Rápida	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
J_L [m ³ /h]	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

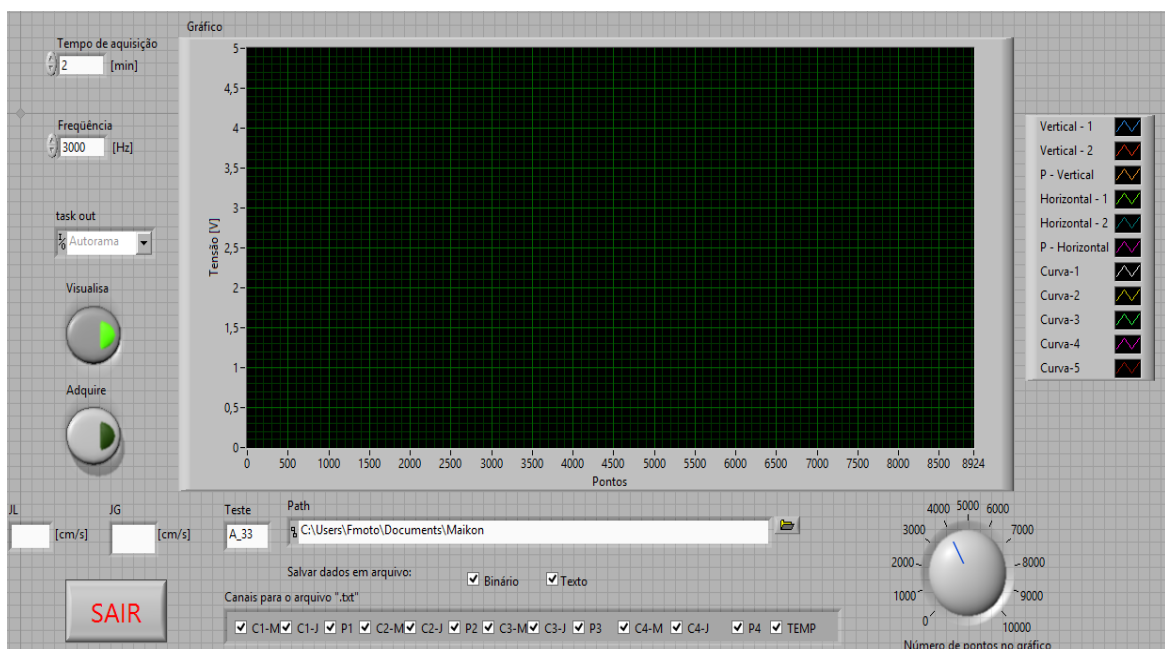
Las pruebas se realizaron en conjunto con el estudiante de maestría Maikon Bressani que utilizará los datos para validar los resultados dados por un modelo numérico desarrollado por el grupo de investigación que determina la velocidad y longitud de las burbujas y pistones de líquido, la fracción de vacío y la caída de presión. Su trabajo va a utilizar los resultados obtenidos del presente trabajo, para comparar los resultados del modelo numérico y los dos instrumentos de medición. Como resultado será publicado un artículo, el cual aún está en desarrollo y será presentado en el congreso internacional de ingeniería mecánica (COBEM 2015).

A continuación se presenta el procedimiento de ajuste, configuración y sincronización de los sensores de impedancia y la cámara de filmación rápida para adquirir datos y capturar las imágenes.

6.1 AQUISIÇÃO DE DATOS CON LA SONDA DE IMPEDANCIA

Los valores de la impedancia son adquiridos por el programa "Adquire Dados Slug" que se muestra en la figura 26.

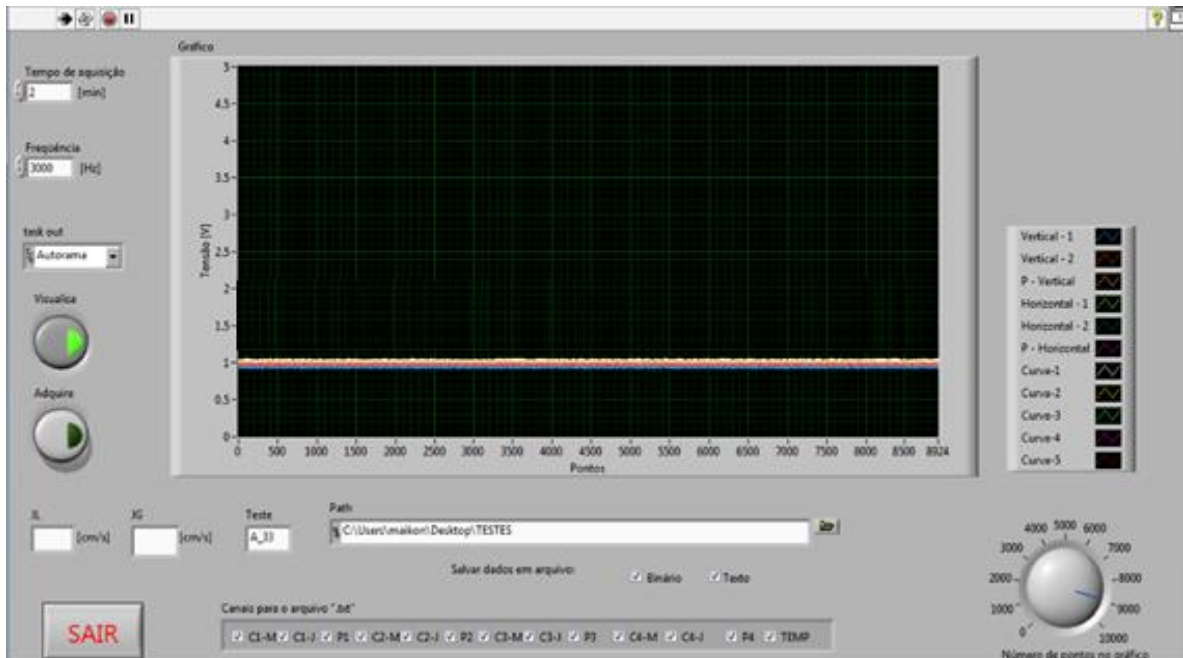
Figura 26. Interfaz de adquisición de señales



Procedimiento para adquirir los datos:

- I. Clicar en el botón "run" para visualizar y verificar que la señal esté siendo adquirida.
- II. Visualizar la señal de las sondas de cada estación. Si la señal presenta ruidos debe ser calibrada mediante dos botones ubicados en la placa controladora (figura 24) usando el botón "cheio" para el instante cuando la tubería presenta solamente líquido y el botón "vazio" para el instante que presenta únicamente aire. La figura 27 muestra la señal calibrada para el instante en que la tubería está llena de aire.

Figura 27. Señal calibrada para tubería con aire

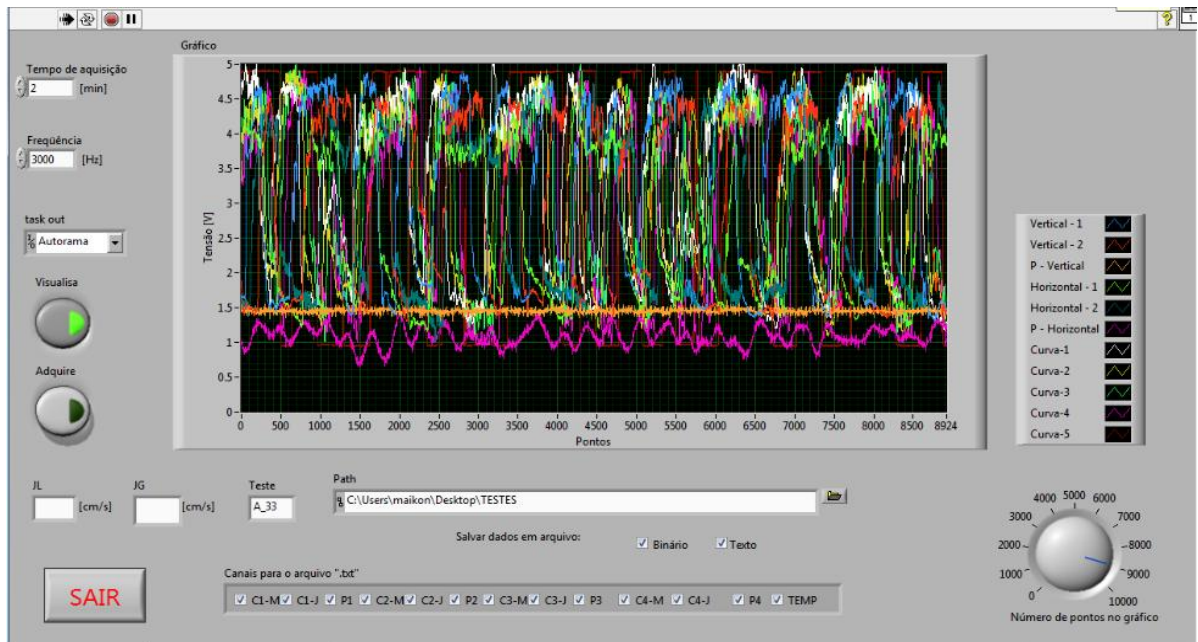


- III. Ajustar los flujos volumétricos de líquido y gas del punto a analizar e indicar: la carpeta de almacenamiento de datos, la frecuencia y tiempo de adquisición y las velocidades superficiales de las fases. En este paso se debe aguardar hasta que se evidencie que el sistema se encuentra en un régimen permanente, es decir que ambos flujos volumétricos tengan una variación mínima respecto al valor que se desea ajustar.

Para este trabajo se adquirieron datos durante un tiempo de 2 minutos para cada combinación de velocidades de la tabla 5 a una frecuencia de 3000 Hz.

IV. Se da se da clic en "Adquire" para comenzar a adquirir. La figura 28 muestra la interfaz durante la adquisición de datos.

Figura 28. Interfaz durante el proceso de adquisición

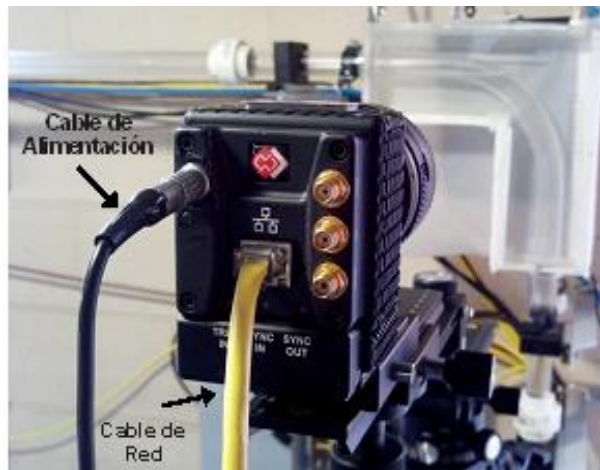


Al terminar se genera automáticamente un archivo .adq que contiene todos los puntos medidos por los sensores de impedancia. El procedimiento anterior es el mismo para los dos casos de estudio.

6.2 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

La adquisición de imágenes se realiza implementado el software Motion Studio junto con la cámara Nikon MotionXtraN3 .La cámara se alimenta por una fuente de 20 V y es conectada al computador por medio de un cable de red como se muestra en la figura 29.

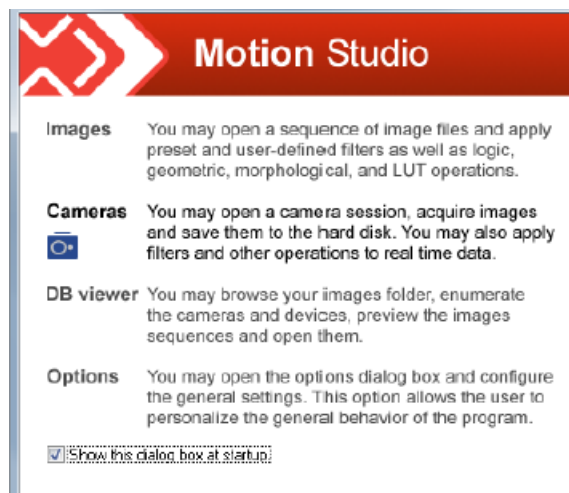
Figura 29. Conexión cámara de filmación rápida



A continuación se presenta la secuencia de pasos necesaria para conectar la cámara, sincronizarla con el programa y adquirir las imágenes.

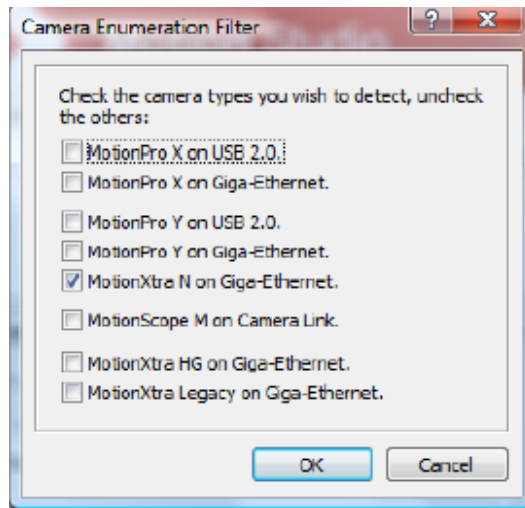
- I. Abrir el programa y seleccionar el modulo "Cameras" de adquisición de imágenes (figura 30)

Figura 30. Menú principal Motion Studio



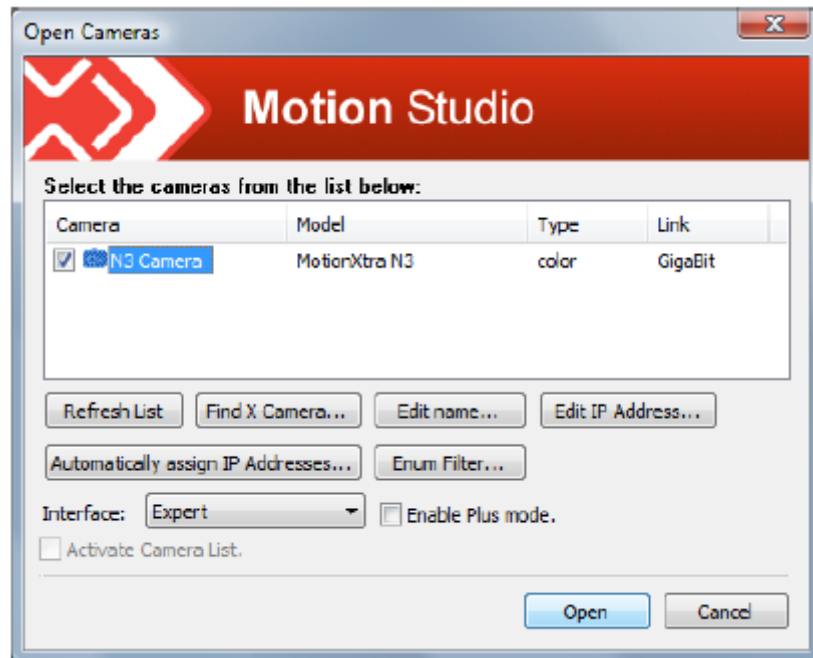
- II. Seleccionar la opción “MotionXtra N on Giga-Ethernet”.

Figura 31. Menú selección cámara



Una vez reconocida la cámara, aparecerá en la ventana "Open Cameras" (figura 32). Se selecciona y se da clic en “Open” para abrir la ventana de configuración y adquisición de imágenes (figura 33 y 34).

Figura 32. Menú abrir módulo de adquisición



En esta ventana, se da clic en "Live" para visualizar la imagen, ajustar el foco y ubicar la cámara en la posición de la sección que se desea filmar. El foco es ajustado hasta que los números de las reglas que están sumergidas en el acuario se puedan visualizar claramente en la pantalla del ordenador. Las reglas están alineadas paralelamente al centro de la tubería para garantizar que la lente esté enfocada en ese punto, donde se trasladan las burbujas alargadas.

El último paso para finalizar la configuración entre la cámara y el programa, es configurar los parámetros de sincronización y frecuencia de adquisición dependiendo del panel a utilizar.

Figura 33. Configuración para sincronización externa

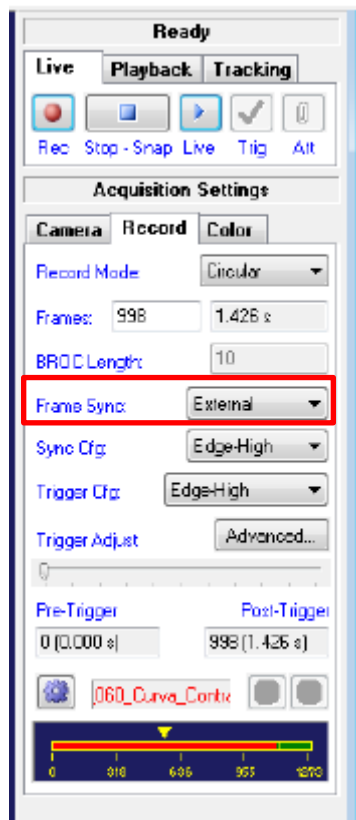
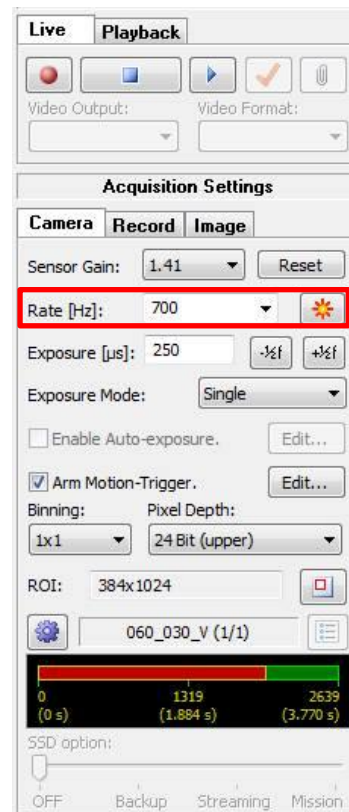


Figura 34. Configuración de la frecuencia de adquisición



Para el caso del panel con sincronización, en "Acquisition Settings" se selecciona en la opción "Frame Sync" la configuración "External" (figura33), la cual quiere

decir que el obturador de la cámara y la luz emitida por el panel van a sincronizarse durante la captura de imágenes, de tal forma que para el instante en que el obturador se abra, el panel emitirá una luz a máxima intensidad, de modo que la iluminación sea la mejor posible para capturar el evento. En la pestaña "cámara" en la opción "Rate [Hz]" se digita una frecuencia de 455 Hz, que corresponde a la frecuencia máxima a la que puede emitir luz este panel.

Para el caso del panel Led de corriente continua, se deja la configuración por defecto en "Frame Sync". La frecuencia que se eligió para este panel fue mayor (700 Hz) aprovechando que el panel emite una luz de intensidad continua.

Una vez realizadas las configuraciones y ajustes de los pasos mencionados anteriormente, se ajustan los flujos volumétricos del punto que se desea analizar y se aguarda hasta que el sistema se encuentre en un régimen permanente.

Por último, se da clic en el trigger/pulsador (figura 18) para comenzar a capturar las imágenes con el panel sincrozado (figura 17). En el caso del panel de luz continua se da clic en "REC". Al finalizar, se guardan las imágenes en formato .TIFF.

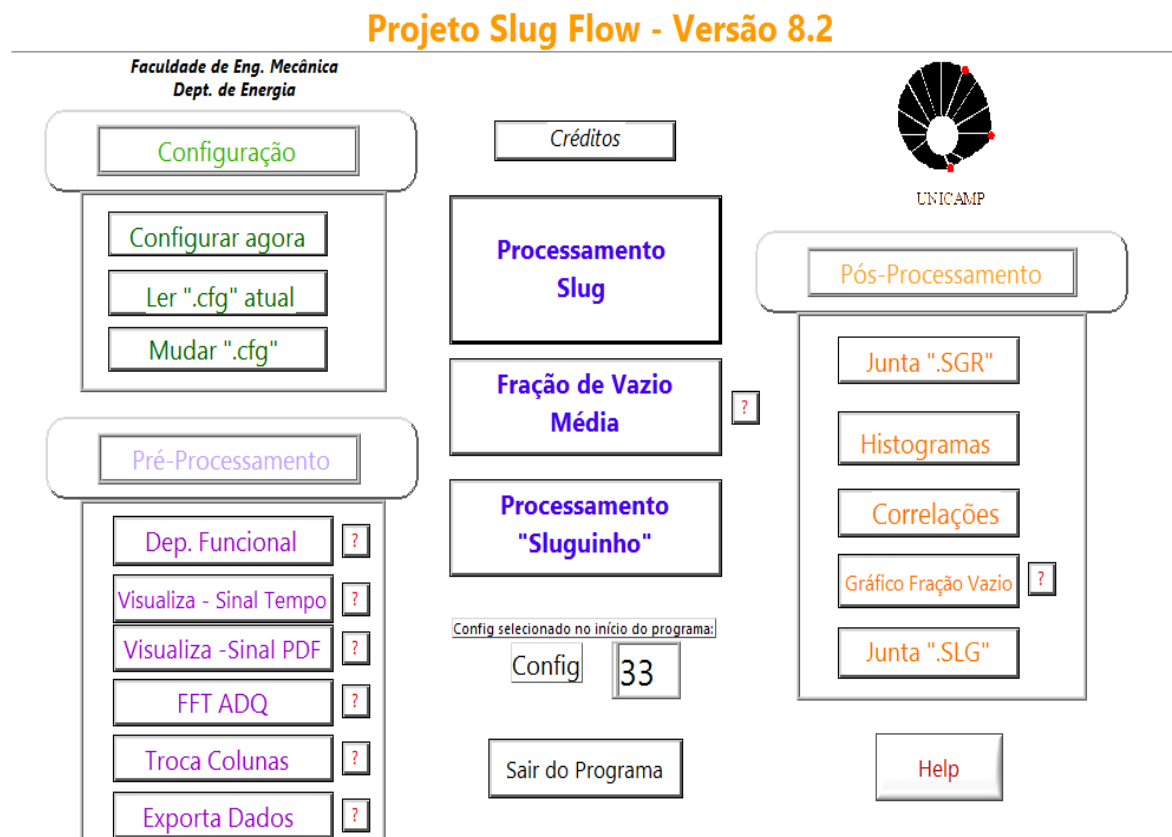
8. CALCULO VELOCIDAD DEL FRENTE DE LA BURBUJA.

El propósito de esta sección es presentar los pasos necesarios para determinar la velocidad del frente de la burbuja utilizando los datos adquiridos por la sonda de impedancia y las imágenes capturadas por la cámara.

8.1 CALCULO DE LA VELOCIDAD UTILIZANDO LA SONDA DE IMPEDANCIA.

Los datos adquiridos por el programa "Adquire Dados Slug" son analizados utilizando el programa "Slug_v8.2" (figura 35). Su función es organizar los datos adquiridos por "Adquire Dados Slug" y calcular parámetros como: VB (velocidad de la burbuja), VS (Velocidad del pistón de líquido), LB (longitud de la burbuja), LS (Longitud del pistón de líquido), entre otros.

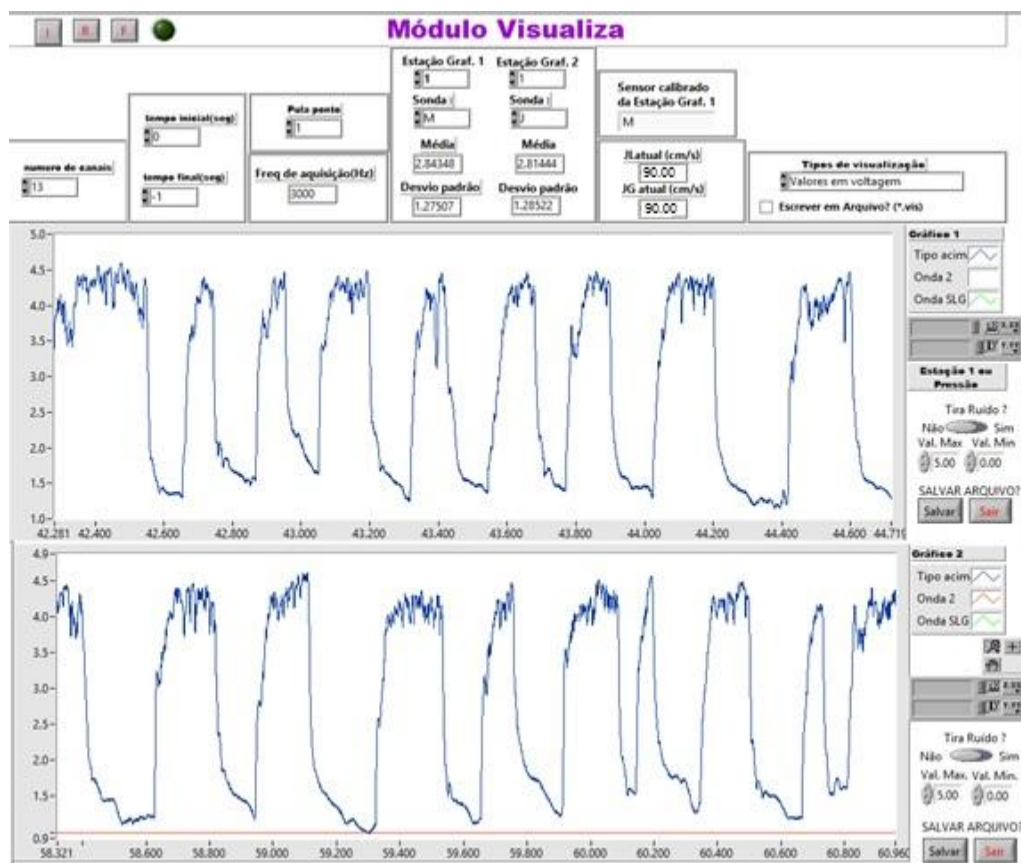
Figura 35. Interfaz programa procesamiento de señales



En la sección "Visualiza-Sinal tempo" (figura 36) del módulo de Pre-procesamiento se visualiza la señal adquirida en cada estación de medición. En esta sección se verifica que la señal adquirida esté correcta antes de continuar con el procesamiento.

Para visualizar la señal, se da clic en "I", se selecciona el archivo .adq generado en la adquisición y se verifica que la señal sea continua y semejante a una señal cuadrada, similar a como se muestra en la figura 36.

Figura 36. Señal adquirida para $J_G = 90, J_L = 90$ en Interfaz "Visualiza- Sinal"



La nomenclatura implementada para relacionar las sondas y su ubicación con cada estación se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Nomenclatura estaciones y ángulo de ubicación de las sondas de impedancia

Curva		Tramos Rectos	
Estación	Ubicación Sondas [Grados]	Estación	Ubicación Sondas
1	75 y 60	1	Vertical
2	60 y 45	2	Horizontal
3	45 y 30		
4	30 y 15		

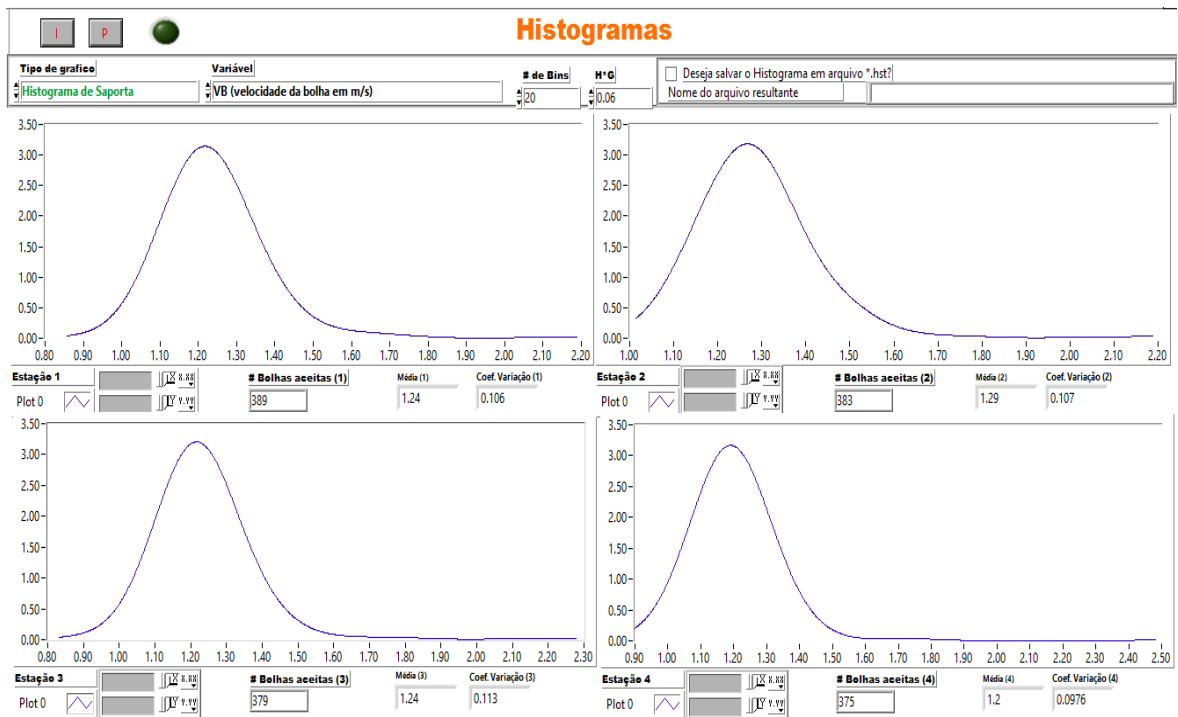
En la sección "Processamento Slug " se generan los archivos (.SGR y .SMD) que se utilizan para generar histogramas de los parámetros, que son gráficos para visualizar las variables del flujo mencionadas anteriormente.

En esta sección se indica el valor del factor de corte. El criterio para escoger su valor depende de un gráfico de dependencia que muestra el número de burbujas para diferentes valores de corte. Este grafico se genera en la sección de "Dependencia Funcional". El valor adecuado es el que da el mismo número de burbujas para dos sondas de una misma estación. Gomez (2010) muestra el procedimiento detallado para determinar su valor. Para el presente trabajo se determinó un factor de corte de 0,8.

8.2 HISTOGRAMAS DE FLUJO DE AMBAS FASES

En este módulo se visualiza la distribución estadística y el valor medio de los parámetros del flujo, así como el número de burbujas que pasan en cada estación. La configuración del programa está diseñada para determinar valores medios de cada uno de los parámetros, por lo tanto este procedimiento únicamente puede ser utilizado para los experimentos con flujo de ambas fases (tabla 5) en donde se presentan gran cantidad de burbujas en cada prueba. La figura 37 muestra el histograma de velocidad de las burbujas de las 4 estaciones de la curva para la combinación $J_G = 90, J_L = 90$ (cm/s).

Figura 37. Histograma velocidad de la burbuja en m/s de la curva



Los valores medios obtenidos del histograma de la curva corresponden a la velocidad media en el ángulo medio de las sondas de impedancia de cada estación. Es decir que para la estación 1, cuyas sondas están ubicadas a 75 y 60

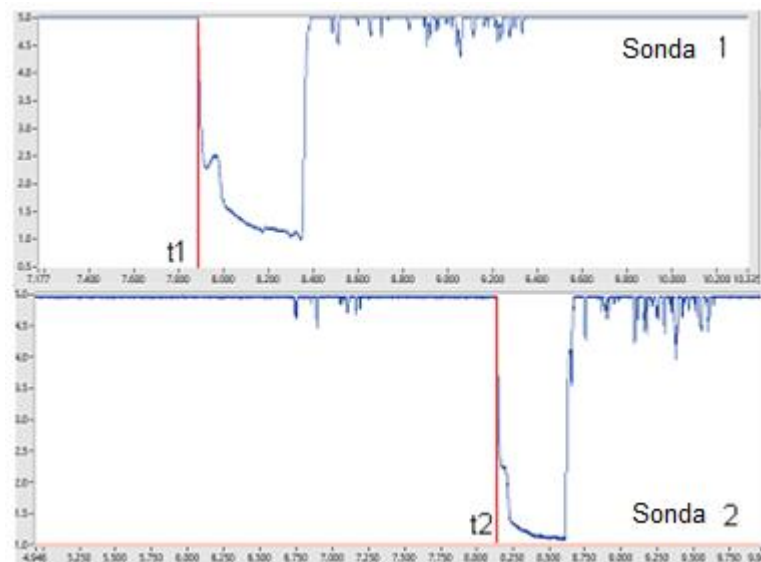
grados, la velocidad media obtenida corresponde a la velocidad media en el ángulo de 67,5 grados. Del mismo modo para las demás estaciones.

Las velocidades medias de todos los testes son calculadas y tabuladas realizando el procedimiento anterior.

8.3 BURBUJA AISLADA

El cálculo de la velocidad del frente de la burbuja aislada se realiza determinando el tiempo que tarda el frente de la burbuja en pasar entre dos sondas. Cuando el frente de la burbuja hace contacto con la sonda, la señal disminuye a medida que la burbuja pasa la sección transversal y hay mayor presencia de la fase gaseosa en contacto con la sonda. Ese instante es identificado en la señal de las dos sondas que conforman cada estación de medición para determinar el tiempo que tarda el frente de nariz en recorrer la distancia entre ambas sondas. La figura 38 muestra la señal adquirida por las sondas de la estación vertical para una burbuja aislada.

Figura 38. Señal de impedancia de una burbuja aislada en la sección vertical



La velocidad del frente de burbuja está dada por:

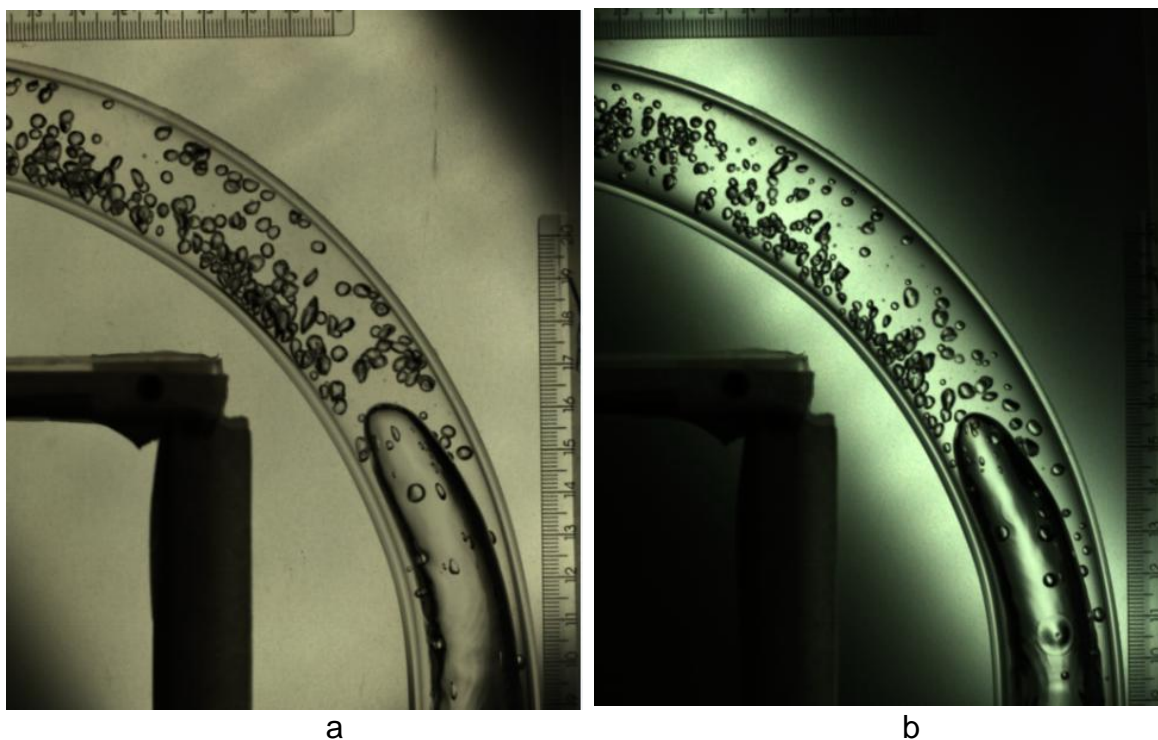
$$U_B = \frac{d}{\Delta t} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (53)$$

Donde d es la distancia de separación entre las sondas (0,112 m) y Δt la diferencia de tiempo ($t_2 - t_1$), cuyos valores se determinan utilizando el módulo “Visualiza-Sinal tempo” para todos los puntos de la tabla 6.

8.4 CALCULO DE LA VELOCIDAD DEL FRENTE DE LA BURBUJA CON LAS IMÁGENES DE LA FILMACIÓN RÁPIDA.

Como se mencionó en el capítulo 5, la adquisición de las imágenes se hizo utilizando dos tipos de paneles led en la parte posterior de la curva. Para el presente trabajo, se escogieron las imágenes capturadas por el panel de luz continua, pues como se ve en la figura 39, este genera una mejor iluminación en la imagen y da mejores detalles del borde de la burbuja alargada.

Figura 39. Imágenes obtenidas del panel led de luz continua (a) y del panel elaborado por el grupo 2PFG (b).



Para determinar la velocidad del frente de la burbuja alargada a partir de las imágenes, el primer paso consiste en identificar las burbujas dispersas que se encuentran agrupadas y no permiten distinguir la burbuja alargada, y enmarcarlas como elementos no deseados para el procesamiento. En otras palabras se busca separarlas y eliminarlas, dejando solo el perfil de la burbuja alargada.

La técnica se conoce como "Watershed transform" y se utiliza como estrategia en la segmentación de imágenes. Consiste en tratar la imagen como una superficie topográfica (figura 41), identificando cuencas hidrográficas y líneas bordes de cuenca, en donde los pixeles claros son zonas de alto y los pixeles oscuros son zonas de bajo. El término cuenca se refiere a las cuencas hidrográficas en un sistema fluvial que drenan el agua de un territorio a través de un río.

Figura 41. Imagen escala de grises

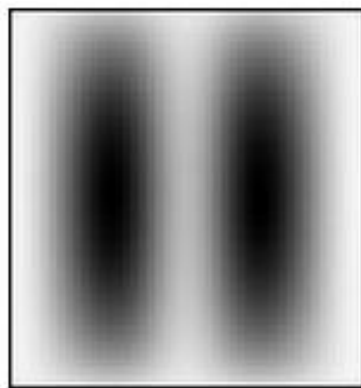


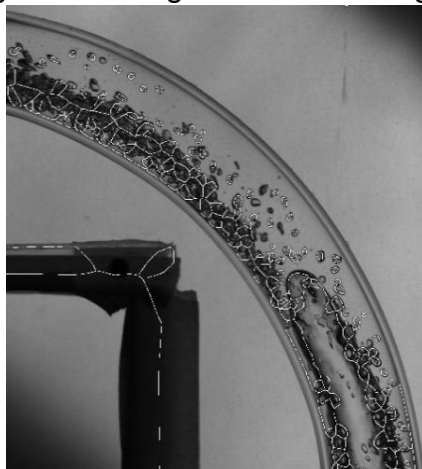
Figura 40. Representación imagen como superficie.



Fuente: <http://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/the-watershed-transform-strategies-for-image-segmentation.html>

El método identifica estas regiones partiendo de una imagen en escala de grises (figura 40). Su eficiencia depende de las características de la imagen. Estructuras insignificantes para la segmentación pueden alterar los resultados dando como resultado una sobre segmentación (figura 42).

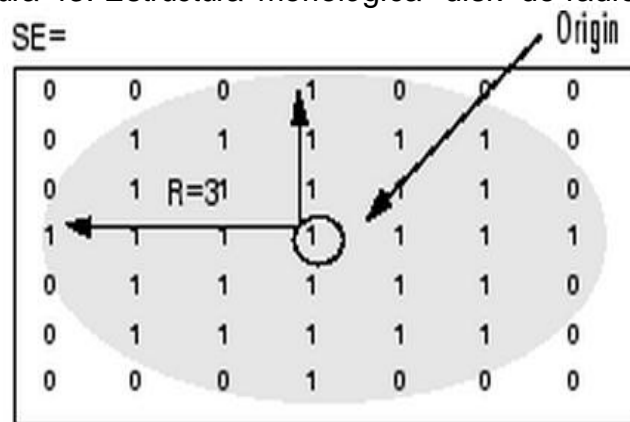
Figura 42. Imagen con sobre segmentación



Una de las alternativas para corregir la sobre segmentación consiste en identificar marcadores en la imagen. En otras palabras, se busca marcar las estructuras más significantes que se desean extraer de la imagen. Extraer estas estructuras acertadamente puede dar una segmentación adecuada. Un enfoque consiste en hacer ajustes en el contraste de la imagen para resaltar la separación de las cuencas, corregir la iluminación y eliminar ruidos y objetos que no pertenecen a la estructura que se quiere identificar. Para realizar esta tarea se implementó el módulo de procesamiento de imágenes de MatLab.

La combinación de los filtros Bottom-hat y Top-hat mejora el contraste de la imagen. Estos operan con estructuras morfológicas o formas que se emplean para comparar pixeles de la imagen de entrada con los pixeles vecinos e identificar formas o estructuras específicas en una imagen binaria, es decir a blanco y negro o escala de grises para posteriormente hacer una operación. El filtro H-mínima transform, elimina todas las intensidades cuyos valores sean mayores a un determinado valor h . La estructura morfológica considerada es un disco de radio "r1" (figura 43).

Figura 43. Estructura morfológica "disk" de radio 3.



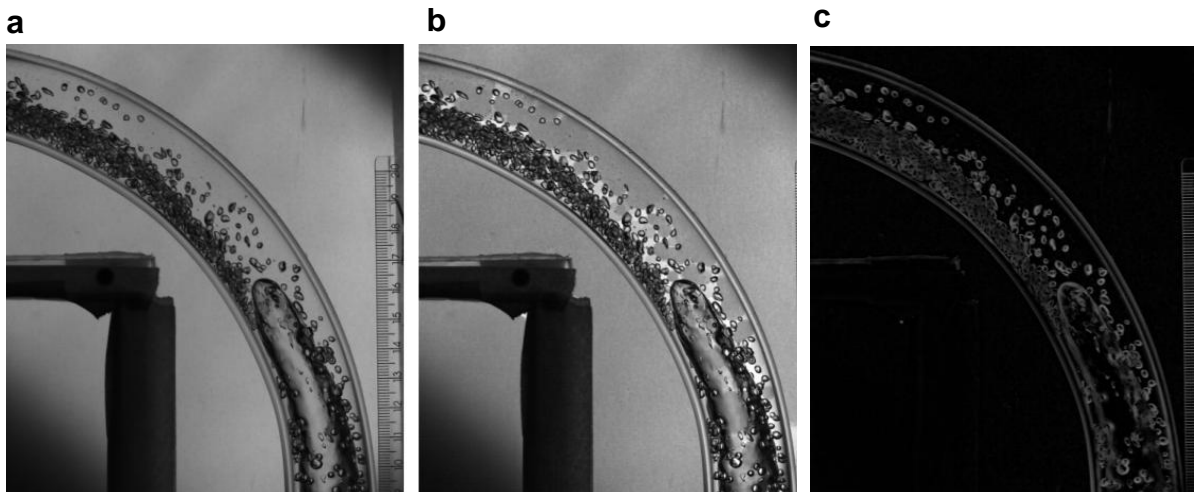
Fuente: <http://www.mathworks.com/help/images/ref/strel.html>

Pequeñas manchas en la imagen se eliminan utilizando la combinación de dos filtros fundamentales de procesamiento de imágenes morfológicas: Dilatación y erosión. La dilatación da el máximo valor de todos los píxeles vecinos. La erosión, al contrario de la dilatación, el valor de píxel de salida es el mínimo valor de todos los píxeles vecinos en la estructura. Para obtener una mayor eficiencia en la remoción de manchas sin afectar la forma general de los objetos, se implementa una reconstrucción de imagen basada en los dos filtros anteriores.

Al igual que en los filtros Bottom-hat y Top-hat, se considera la estructura morfológica de la figura 43 de radio "r2". La técnica discutida aquí se basa en la desarrollada por C.E.F.do Amaral (2013), diferenciándose en que en el presente trabajo se utiliza un filtro de erosión y dilatación por reconstrucción antes de aplicar la técnica "Watershed Transform"

La combinación de los tres filtros anteriores da una imagen mejorada con los detalles/marcadores del perfil de la burbujas alargadas que se implementa para hacer el Watershed sin dejar marcas de sobre segmentación. El resultado final de este proceso depende de la elección de los valores de estos parámetros.

La figura 44 muestra el resultado final y el paso a paso de los filtros aplicados a una imagen de una burbuja en la curvatura para $J_L = 90$ y $J_G = 90$ [cm/s].



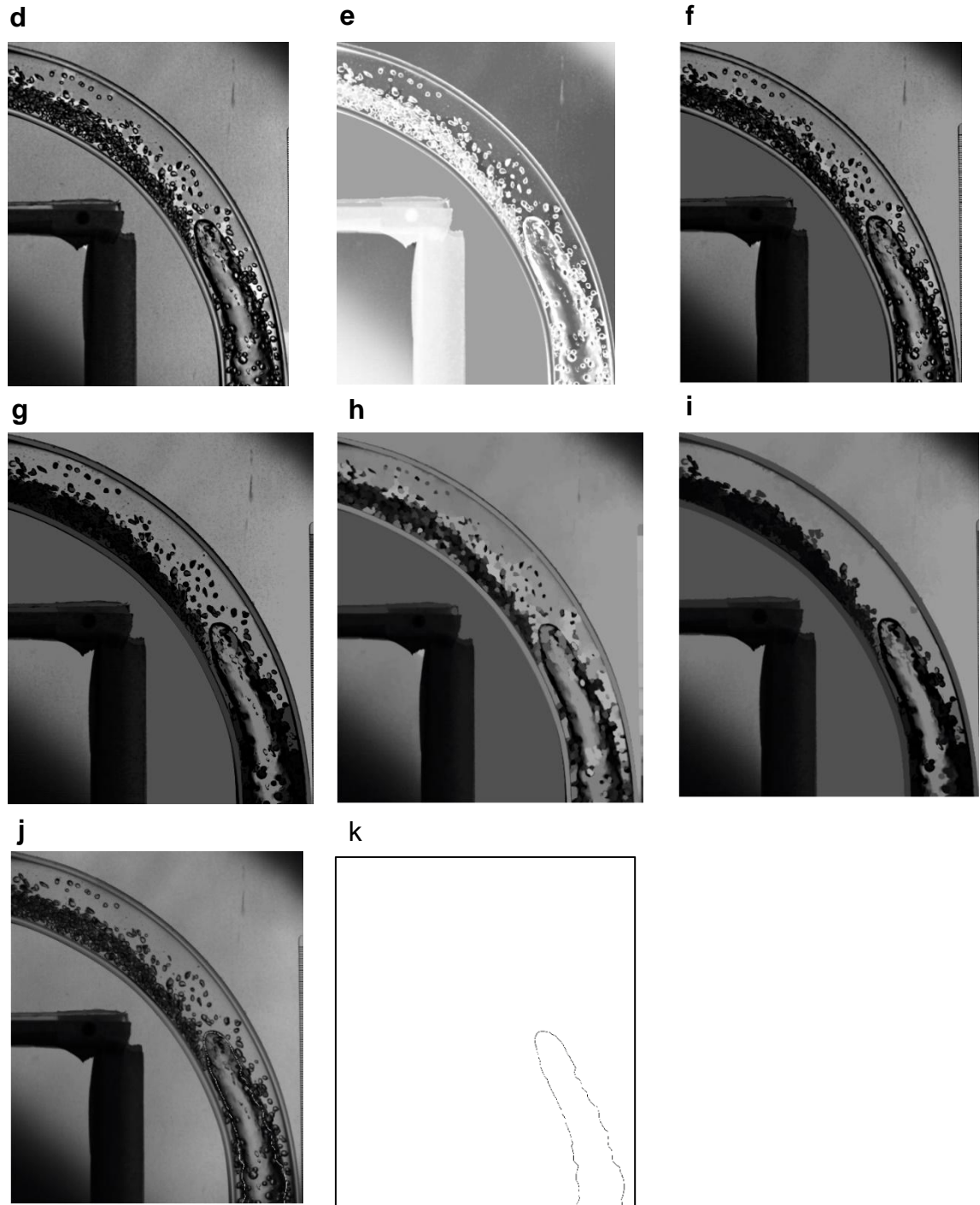


Figura 44. Paso a paso del procesamiento de imágenes para la segmentación. (a) Imagen escala de grises, (b) Top-hat, (c) Bottom-hat, (d) Subtract Bottom-hat-Top-hat, (e) Complemento, (f) H-mínima transform, (g) Reconstrucción por erosión, (h) Dilatación, (i) Erosión y Dilatación, (j) Watershed transform sobre imagen original, (k) Watershed (perfil de la burbuja).

El procedimiento es el mismo para las imágenes capturadas en el tramo vertical y horizontal.

La facilidad para encontrar el valor de los parámetros que dan una buena segmentación depende de la cantidad de burbujas dispersas que estén en contacto con la burbuja alargada, es decir que entre mayor sea la velocidad de la fase gaseosa más complejo se hace la búsqueda de estos parámetros.

Se encontraron dos combinaciones de los parámetros del filtro (Tabla 8) que dieron los mejores resultados en la segmentación de la burbuja.

Tabla 8 Parámetros seleccionados para el procesamiento

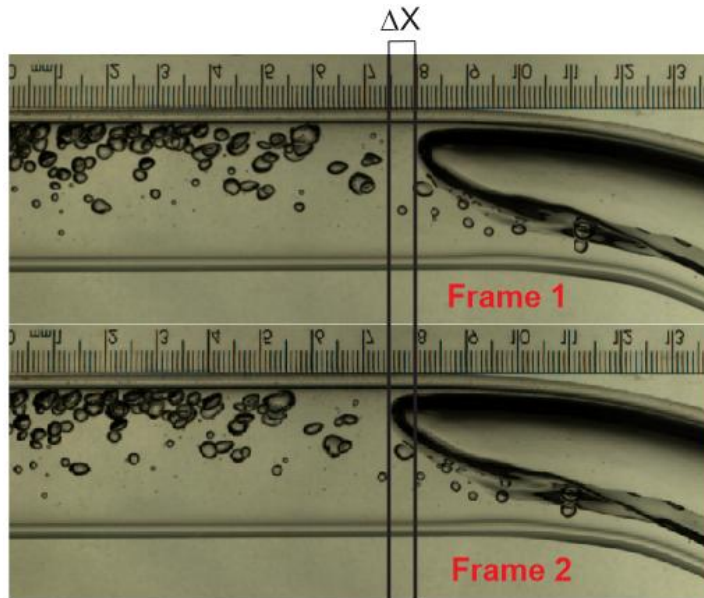
Filtro N°	Radio disk "r1"	H-min transform	Radio disk "r2"
1	1	70	12
2	5	70	6

Los valores presentados en la tabla 8 funcionan para la mayoría de imágenes de una misma prueba, sin embargo se presentan imágenes en donde el filtro no consigue identificar adecuadamente la burbuja. Se atribuye este problema a una posible variación en la luz emitida por el panel que no es perceptible al ojo humano.

Por esta razón el proceso se hace iterativo, y en algunos casos es necesario utilizar varias combinaciones de filtros para obtener una segmentación adecuada.

Una vez determinados los perfiles de las burbujas alargadas, se determina la velocidad media de la burbuja calculando el desplazamiento del frente de la burbuja entre dos imágenes consecutivas y dividiéndolo entre el tiempo transcurrido entre ellas. La figura 45 representa estos puntos en el frente de una burbuja alargada en la sección horizontal para dos instantes de tiempo.

Figura 45. Imágenes consecutivas de una burbuja fluyendo en el tramo horizontal.



La velocidad entre los dos puntos está representada por:

$$U_B = \frac{\Delta X}{t} \left[\frac{\text{pixeles}}{s} \right] \quad (64)$$

Donde ΔX representa el desplazamiento en pixeles y t el tiempo de captura entre ambas imágenes. Este tiempo es equivalente al inverso de la frecuencia de adquisición de las imágenes ($1/f$).

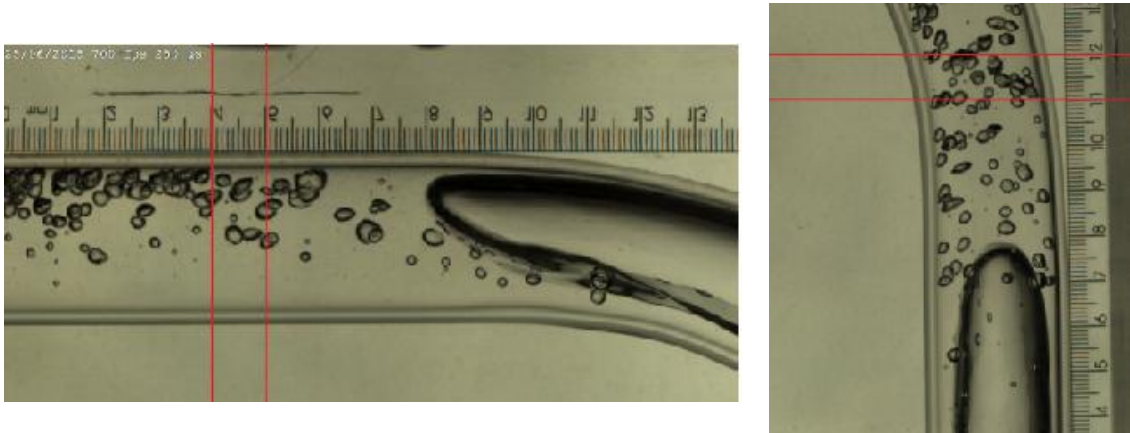
$$U_B = \Delta X * \varepsilon * f \left[\frac{cm}{s} \right] \quad (75)$$

Un código desarrollado en MatLab para el tramo horizontal, vertical, y la curva fue desarrollado para identificar estos puntos imagen a imagen y determinar la velocidad y desplazamiento del frente de la burbuja entre cada par de imágenes. A continuación se describe el procedimiento utilizado en el programa para cada tramo de análisis.

8.4.1 Tramo horizontal y vertical

- I. Se trazan dos líneas en la imagen sobre las líneas de la regla en un espacio correspondiente a un centímetro (figura 46) para obtener la escala ε en *cm/píxeles*.

Figura 46. Líneas para determinar la escala ε en cm/píxeles



- II. Se traza una línea sobre la imagen y se identifica visualmente el centro de la nariz de la burbuja (figura 47). Este punto se utiliza como referencia para hacer un promedio de la coordenada del centro de la burbuja con los píxeles vecinos en una región de área $X_m * Y_m$ (píxeles cuadrados). La figura 48 representa esta área para una burbuja fluyendo en la sección horizontal.

Para la burbuja en tubería horizontal, se identifica un punto cercano detrás del frente de burbuja de la primera imagen (figura 47) para usarlo como una coordenada inicial.

Figura 47. Línea centro de nariz (roja) y línea de un punto detrás del frente de la primera imagen de burbuja (azul)

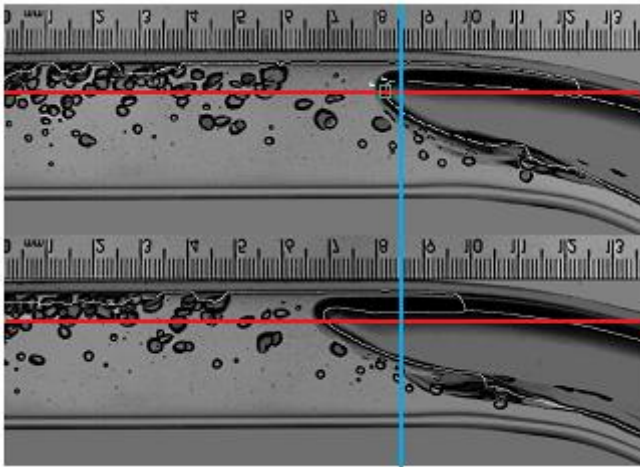
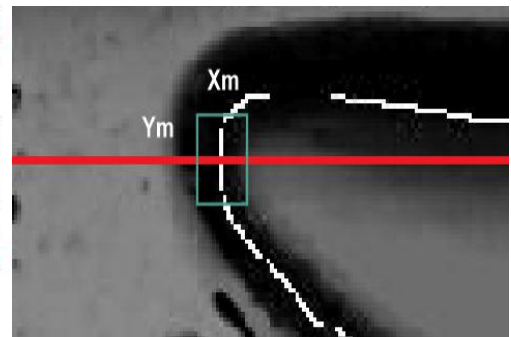
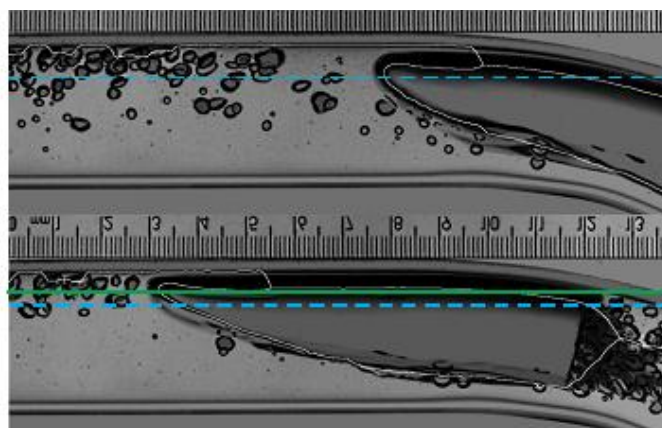


Figura 48. Área para promedio coordenada del centro



El desplazamiento transversal de la burbuja respecto de la tubería en el tramo horizontal (figura 49), se tiene en cuenta haciendo un seguimiento a la línea que se utiliza para determinar el centro de la nariz de la burbuja. Para el tramo vertical no es necesario realizar un seguimiento, ya que la burbuja mantiene su frente de nariz en el centro de la tubería.

Figura 49. Movimiento transversal del frente de nariz en tubería horizontal.



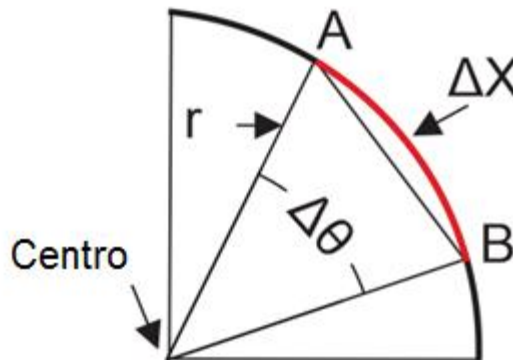
Por último, se determina la velocidad entre cada par de imágenes utilizando la ecuación 15. La velocidad del frente de la burbuja está dada por el promedio de todas las velocidades calculadas.

8.4.2 Tramo Curvo

A diferencia del flujo en el tramo vertical y horizontal, el desplazamiento de la burbuja en la curva no se da longitudinalmente. La trayectoria que recorre la burbuja en la transición es la de un arco de circunferencia de radio r con centro en coordenadas (x, y) , como se muestra en la figura 50.

El radio del arco varía dependiendo del movimiento transversal del frente de la burbuja a lo largo de la curva, siendo menor cuando la burbuja se desplaza por el radio interior de la tubería y mayor cuando se desplaza por el exterior.

Figura 50. Representación trayectoria arco de curva.



El desplazamiento entre los puntos A y B está dado por:

$$\Delta x = \Delta \theta * r \text{ [pixeles]} \quad (86)$$

Donde $\Delta \theta$ es el ángulo formado entre los dos puntos y r es el radio del arco con centro en las coordenadas (x, y) .

La velocidad entre ambos puntos es:

$$U_B = \frac{\Delta\theta * r}{t} = \Delta\theta * r * f * \varepsilon \left[\frac{cm}{s} \right] \quad (97)$$

Para determinar U_B , el primer paso es buscar las coordenadas (x, y) del centro del arco y el radio medio de la tubería (figura 51). Seguido se determina la escala ε en *cm/pixeles* de la misma forma que para el tramo vertical y horizontal (figura 52).

Figura 51. Coordenadas (x, y) del centro del arco y radio medio.

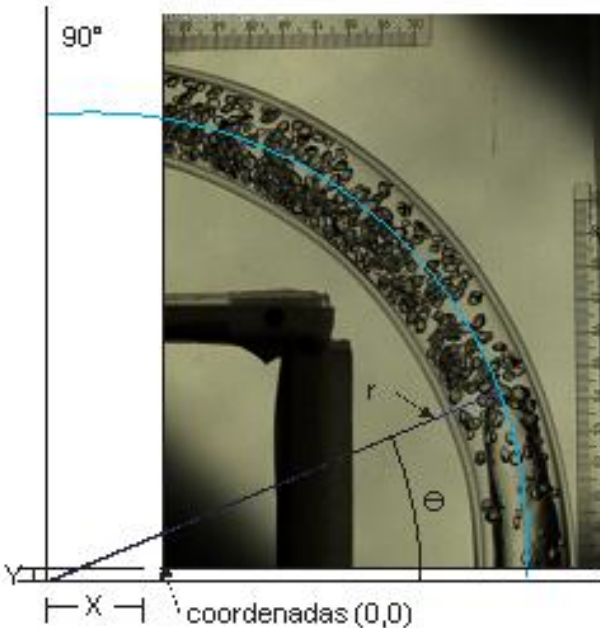
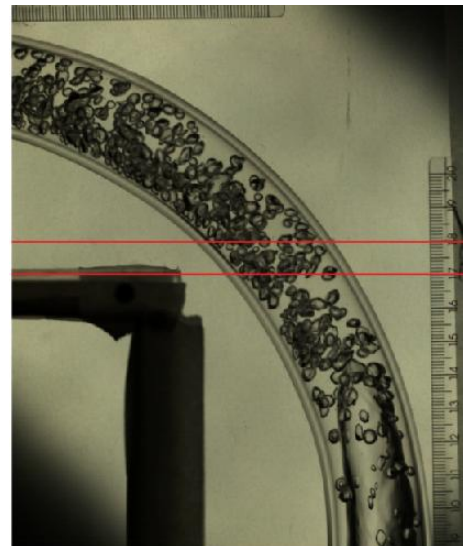
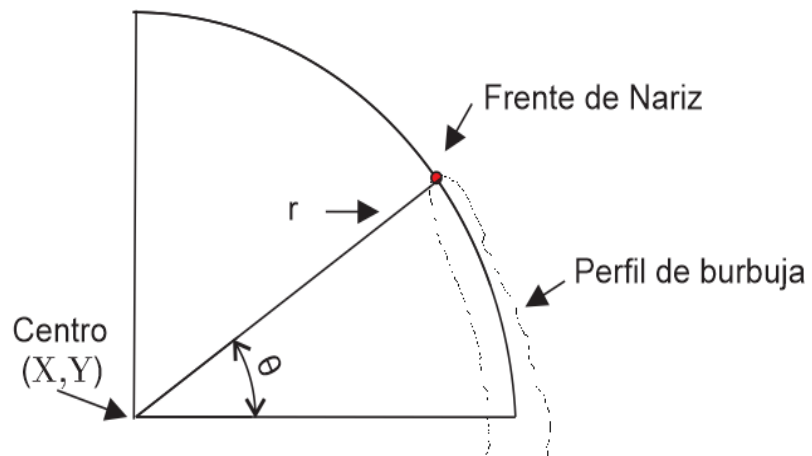


Figura 52. Líneas para determinar la escala ε en *cm/pixeles*



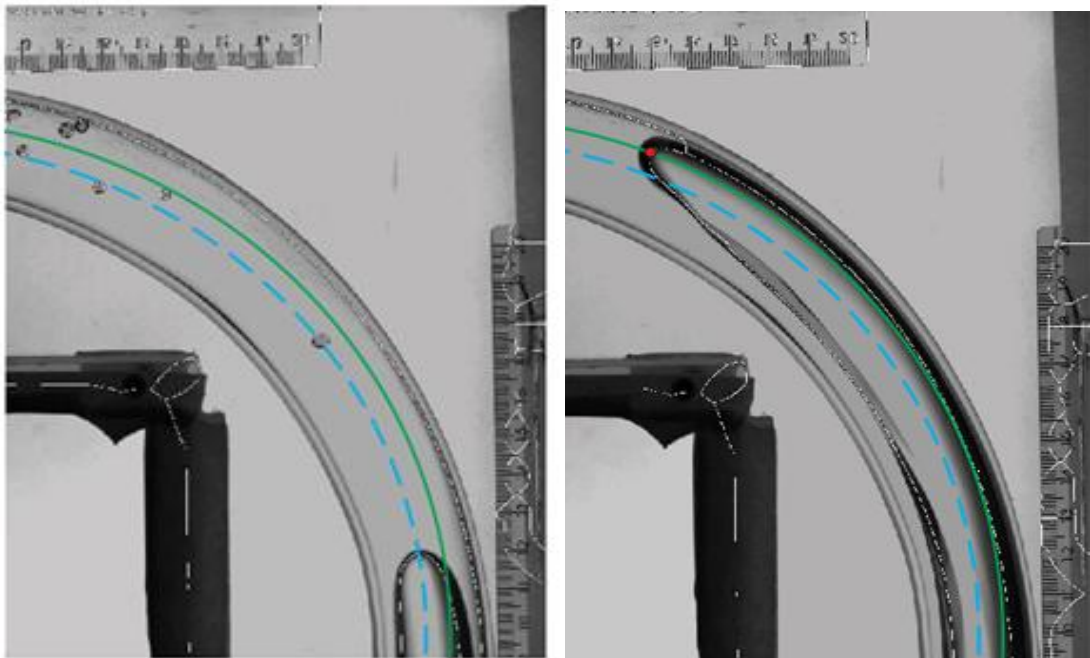
Se identifican los puntos del frente de la burbuja en los perfiles de las burbujas obtenidos del procesamiento. Estos puntos se identifican siguiendo la curva de arco definida con coordenadas (x, y) y radio r desde la horizontal hasta su intersección con el perfil de la burbuja. La figura 53 muestra este procedimiento.

Figura 53. Representación del punto del frente de la burbuja en un perfil



El movimiento transversal del frente de la burbuja se tiene en cuenta ajustando el radio del arco que corta con el perfil de la burbuja. La figura 54 muestra este radio para una burbuja en dos puntos diferentes. En este caso, se puede evidenciar que la burbuja se desplaza hacia el radio exterior de la tubería.

Figura 54. Representación del desplazamiento transversal de la burbuja



Las coordenadas de los puntos de cada imagen son tabulados y se determina el ángulo θ y la velocidad entre cada par de imágenes utilizando la ecuación 17. Con estos resultados, se hace el promedio de todas las velocidades obtenidas entre los ángulos que componen cada estación (tabla 7), puesto que para comparar los resultados obtenidos con las sondas de impedancia con los dados por las imágenes, el parámetro (velocidad) debe ser medido en el mismo punto y bajo las mismas condiciones, o ser equivalente. En este caso, como los resultados de la velocidad dados por los histogramas corresponden a la velocidad en el ángulo medio de las sondas de impedancia y los determinados con las imágenes son en diferentes ángulos de la tubería, se hace el promedio mencionado anteriormente para obtener una velocidad equivalente en los mismos puntos a los dados por las sondas de impedancia. El anexo III muestra la tabla de resultados obtenidos para una burbuja que fluye con velocidades superficiales de las fases $J_L = 90$ y $J_G = 90$ [$\frac{cm}{s}$].

Par facilitar este proceso se desarrolló una interfaz gráfica en MatLab, la cual se presenta en los anexos junto con los pasos para su funcionamiento.

8 .RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección se presentan los resultados de la velocidad del frente de la burbuja obtenidos con ambas técnicas de medición y las observaciones hechas a partir de la visualización de las filmaciones.

8.1 RESULTADOS BURBUJA AISLADA.

En la figura 55 se muestran los resultados experimentales de la velocidad de traslación de la burbuja obtenida por las sondas de impedancia y las obtenidas del procesamiento de imágenes.

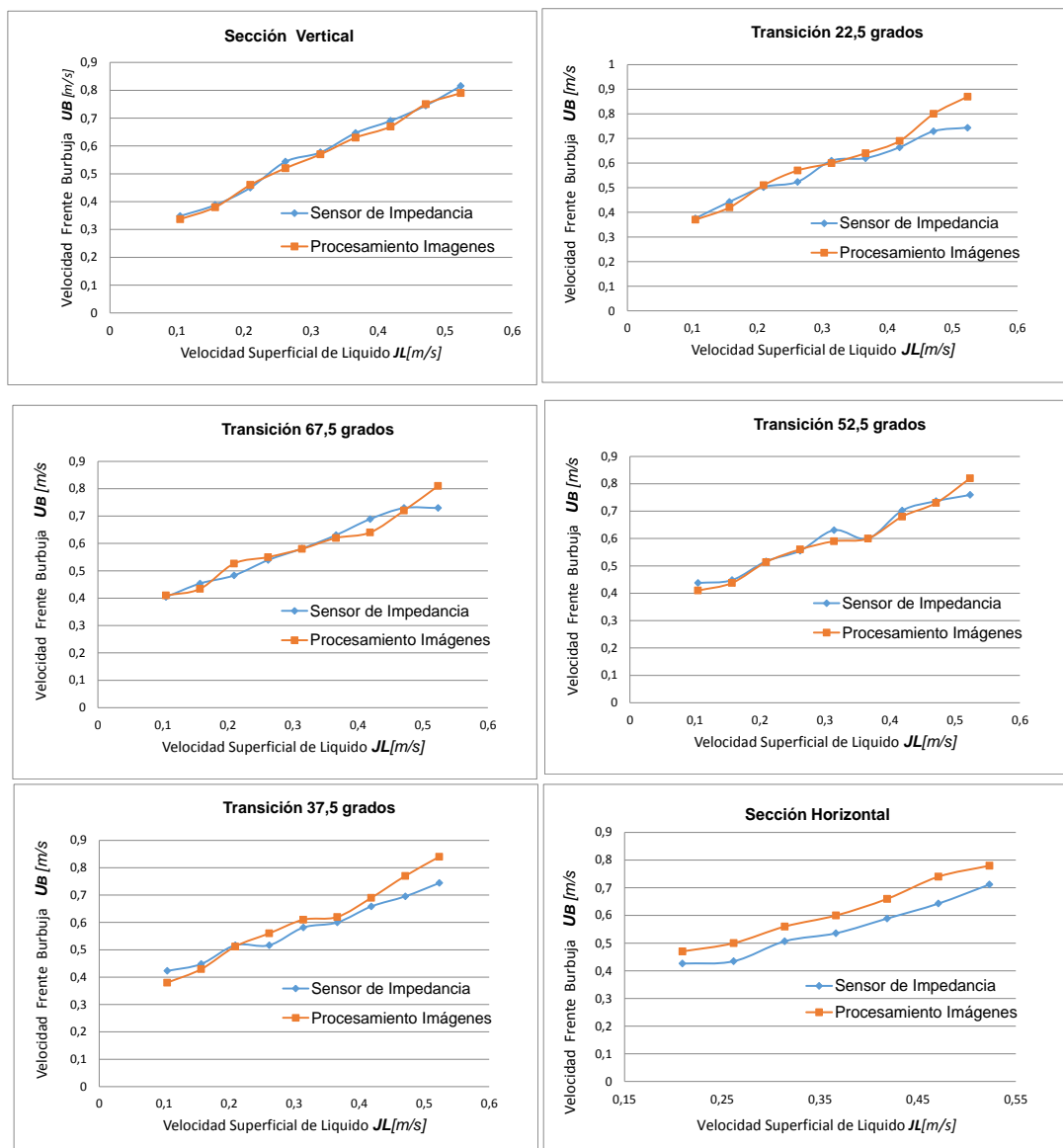
Se observa que la velocidad del frente de la burbuja para todas las secciones medidas tiene una relación lineal con la velocidad de la fase líquida. Esto concuerda con lo planteado por Bendiksen(1984) y lo mencionado en la sección 5.4, en que la velocidad del frente de burbuja viene dada por un término proporcional a la velocidad de la mezcla, en este caso a la velocidad de la fase líquida.

De la gráfica del tramo horizontal se observa que los resultados entre la sonda de impedancia y las imágenes tienen una diferencia casi constante. Esta diferencia se atribuye a que las mediciones con las imágenes se realizaron justo después de la curva y las realizadas con la sonda de impedancia 0,54 metros más delante de la salida de la curva, en donde el flujo para este último punto se encuentra más desarrollado. Es decir que las condiciones en las que fue medida la burbuja para este tramo no eran las mismas.

Las pruebas para el tramo horizontal se realizaron a partir de un flujo volumétrico de 0,4 (m^3/h) de líquido, ya que para los flujos de 0,2 y 0,3 (m^3/h) la fuerza de arrastre entre las fases no es suficiente y la burbuja se estancaba después de la curva y no conseguía llegar hasta la estación de medición.

De lo anterior se puede hacer una relación con lo propuesto por algunos autores en relación al flujo en tubería horizontal. Duckler y Hubbart (1975) propusieron que no debería existir movimiento de la burbuja aislada en líquido estancando en una tubería sin inclinación. En este experimento se consiguió apreciar que lo mencionado por los autores anteriores acontece también para un flujo con velocidades superficiales de líquido menores de 0,157 [m/s] (0,3 m³/h). Por lo cual se puede decir que el movimiento de una burbuja aislada en tubería horizontal está dado por la fuerza de arrastre entre ambas fases.

Figura 55. Comparación experimental sondas de impedancia-filmación rápida de la velocidad de traslación media de la burbuja.



La tabla 9 muestra el porcentaje de diferencias de la medición entre la sonda de impedancia y el procesamiento de imágenes. Se puede observar que en la mayoría de casos, exceptuando la sección horizontal, la diferencia entre los dos instrumentos de medición es pequeña. La diferencia mínima obtenida es del 0,02% y la máxima de 16,9%.

La tabla muestra también que los errores son mayores para los flujos volumétricos: 0.2, 0.9 y 1 [m^3/h], y menores en los flujos intermedios entre estos valores.

Tabla 9- Porcentaje diferencia experimental sondas de impedancia-procesamiento de imágenes

% Diferencia Experimental Sonda de Impedancia - Procesamiento de Imágenes									
m^3/h Sección	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Vertical	3,29%	2,09%	2,17%	4,52%	1,21%	2,63%	3,01%	0,66%	3,19%
Horizontal	*	*	10,3%	15,1%	10,5%	12,0%	12,1%	15,1%	9,5%
22,5 °	1,53%	5,16%	1,45%	8,79%	1,61%	3,23%	3,87%	9,68%	16,9%
37,5 °	10,1%	4,2%	0,9%	8,4%	4,9%	3,3%	4,8%	10,7%	12,9%
52,5 °	6,32%	2,36%	0,57%	0,86%	6,42%	0,02%	3,12%	0,90%	8,01%
67,5 °	1,4%	4,3%	9,0%	2,0%	0,2%	1,7%	7,1%	1,3%	11,0%

El anexo 1 muestra una secuencia de imágenes de una burbuja en un mismo punto de la tubería a las diferentes tasas volumétricas de la tabla 9. Se puede observar que el frente de nariz de la burbuja inicialmente se encuentra hacia el radio externo de la tubería y a medida que se va incrementando el flujo volumétrico de líquido la nariz se desplaza hacia el centro de la tubería. Este desplazamiento se debe a que el aumento en la velocidad de líquido incrementa la fuerza centrífuga de la fase y esta supera a la fuerza de empuje vertical debida a la diferencia de densidades entre las dos fases que mantiene la burbuja en el radio exterior, y hace que la fase líquida ocupe el volumen en el radio externo.

8.2 RESULTADOS FLUJO INTERMITENTE.

Con el fin de comparar y validar los resultados experimentales obtenidos por los dos métodos de medición con el modelo teórico, se utilizaron las ecuaciones de la tabla 4 presentadas por Mazza (2010) para determinar la velocidad teórica del frente de la burbuja para cada sección de teste. La tabla 10 muestra los parámetros utilizados para el cálculo de la velocidad.

Tabla 10. Propiedades hidrodinámicas de las fases.

D =	0,026	m	$\rho_L =$	998	Kg/m ³
$\sigma =$	0,07	N/m ²	$\rho_G =$	1,17	Kg/m ³

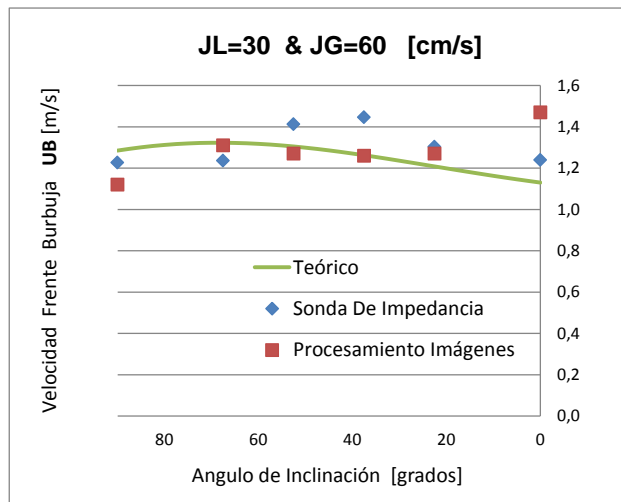
A continuación se presentan los resultados obtenidos para las diferentes combinaciones de velocidades superficiales de las fases de la tabla 5.

N° 1. **JL=30 - JG=60** [cm/s]

Tabla 11. Resultados teórico-experimentales $J_L = 30$ y $J_G = 60$ [cm/s]

Angulo	Velocidad UB [m/s]			Error		
	Teórica	Exp. Sonda	Exp. Imágenes	Teorico-Sonda	Teorico-Imágenes	Sonda-Imágenes
90,00	1,29	1,23	1,12	4,76%	14,74%	8,70%
67,50	1,32	1,24	1,31	6,98%	0,99%	5,93%
52,50	1,31	1,41	1,27	7,67%	2,76%	10,14%
37,50	1,26	1,45	1,26	12,76%	0,16%	12,90%
22,50	1,21	1,30	1,27	7,31%	4,88%	2,56%
0,00	1,13	1,24	1,47	8,87%	23,13%	18,55%

Figura 56. Resultados teórico-experimentales $J_L=30$ y $J_G=60$ [cm/s]



Se observa que para la sección curva, la velocidad obtenida por el procesamiento de imágenes da valores más cercanos a los teóricos que los valores obtenidos por la sonda de impedancia. Los valores obtenidos por la sonda se aproximan más a los valores teóricos para la sección horizontal y vertical.

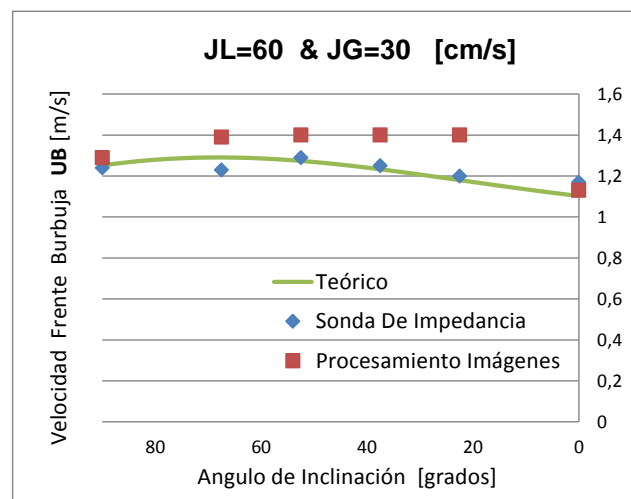
Se puede ver también, que la sonda consigue capturar mejor la tendencia de la curva de velocidad teórica, que incrementa para los primeros grados y disminuye gradualmente.

N° 2. **JL=60 - JG=30** [cm/s]

Tabla 12. Resultados teórico-experimentales $J_L = 60$ y $J_G = 30$ [cm/s]

Angulo	Velocidad UB [m/s]			Error		
	Teórica	Exp. Sonda	Exp. Imágenes	Teórico-Sonda	Teórico-Imágenes	Sonda-Imágenes
90,0	1,253	1,24	1,29	1,05%	2,87%	4,03%
67,5	1,291	1,23	1,39	4,96%	7,12%	13,01%
52,5	1,274	1,29	1,4	1,24%	9,00%	8,53%
37,5	1,233	1,25	1,4	1,36%	11,93%	12,00%
22,5	1,180	1,20	1,4	1,67%	15,71%	16,67%
0,0	1,103	1,17	1,13	5,73%	2,39%	3,42%

Figura 57. Resultados teórico-experimentales $J_L=60$ y $J_G=30$ [cm/s]



Se puede observar que los valores más cercanos del procesamiento de imágenes a los valores teóricos corresponden a la sección vertical y horizontal (90 y 0 grados), para la curva se presenta una desviación mayor de los resultados. La

sonda de impedancia consigue capturar los mejores resultados respecto de los valores teóricos.

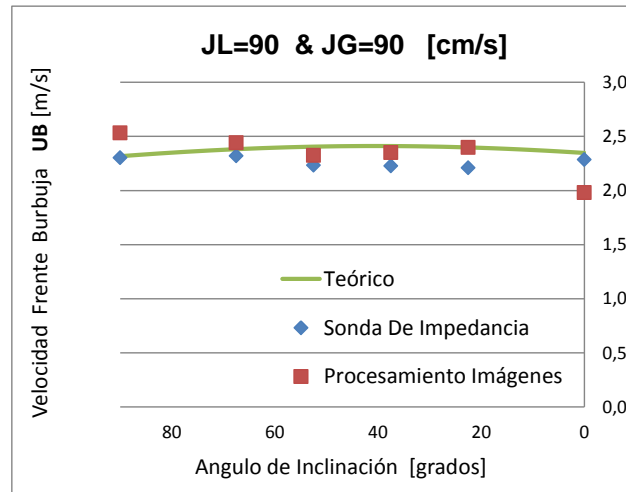
De la tabla, se puede verificar que el error entre los dos instrumentos de medición presenta un error promedio mayor que con respecto al teórico de cada uno de ellos.

N° 3. **JL=90 - JG=90** [cm/s]

Tabla 13. Resultados teórico-experimentales $J_L = 90$ y $J_G = 90$ [cm/s]

Angulo	Velocidad UB [m/s]			Error		
	Teórica	Exp. Sonda	Exp. Imágenes	Teórico-Sonda	Teórico-Imágenes	Sonda-Imágenes
90,0	2,32	2,30	2,53	0,59%	8,47%	9,91%
67,5	2,40	2,32	2,44	3,38%	1,78%	5,25%
52,5	2,41	2,23	2,33	7,95%	3,67%	4,13%
37,5	2,41	2,23	2,35	8,03%	2,29%	5,61%
22,5	2,38	2,21	2,40	7,78%	0,68%	8,52%
0,0	2,35	2,29	1,98	2,64%	18,54%	13,41%

Figura 58. Resultados teórico-experimentales $J_L=90$ y $J_G=90$ [cm/s]



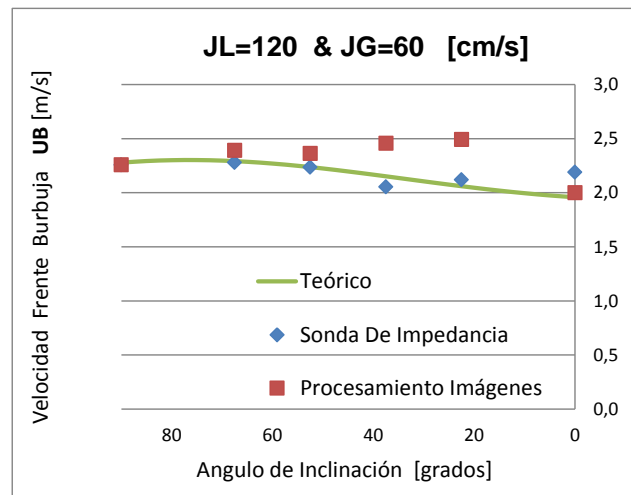
Se puede observar que los resultados del procesamiento de imágenes consiguieron resultados teórico-experimentales con un menor error para la curva, mientras que la sonda de impedancia da mejores resultados para la sección horizontal y vertical.

N° 4. JL=120 - JG=60 [cm/s]

Tabla 14. Resultados teórico-experimentales $J_L = 120$ y $J_G = 60$ [cm/s]

Angulo	Velocidad UB [m/s]			Error		
	Teórica	Exp. Sonda	Exp. Imágenes	Teórico-Sonda	Teórico-Imágenes	Sonda-Imágenes
90,0	2,28	2,26	2,26	0,98%	0,94%	0,04%
67,5	2,06	2,28	2,39	9,63%	4,11%	4,83%
52,5	2,15	2,24	2,36	3,79%	5,34%	5,66%
37,5	2,24	2,05	2,46	8,95%	12,42%	19,67%
22,5	2,29	2,12	2,49	8,12%	17,33%	17,54%
0,0	1,96	2,19	2,00	10,59%	2,09%	8,68%

Figura 59. Resultados teórico-experimentales $J_L=90$ y $J_G=90$ [cm/s]



Se puede ver que la sonda de impedancia consiguió determinar resultados más próximos a los valores teóricos que los dados por las imágenes. Los puntos con mayor desviación se dieron a 22,5 y 37,5 grados, con un error de 17,33% y 12,42% respectivamente.

En general de las gráficas presentadas para todas las pruebas, se observa que la sonda de impedancia presenta resultados con una menor variación en relación al valor teórico cuando se media en las diferentes secciones, en otras palabras, sus resultados no variaban considerablemente dependiendo de la sección medida, mientras que los resultados obtenidos por el procesamiento de imágenes para

algunos casos daban muy cercanos para las secciones rectas pero alejados para la curva, y viceversa.

Lo anterior se explica con base en que el modelo teórico (Tabla 10) que se utilizó para determinar la velocidad teórica, fue desarrollado utilizando bases de datos en donde se contabilizaban grandes cantidades de burbujas con diferentes diámetros de tubería e inclinaciones, utilizando sondas de impedancia como instrumentos de medición. Es decir que la velocidad dada por el modelo es una velocidad promedio de una distribución gaussiana de velocidades. Esta metodología para determinar la velocidad es semejante a la utilizada por la sonda de impedancia en el presente trabajo, en donde se contabilizaron todas las burbujas que pasaban en un intervalo de tiempo de 2 minutos para cada prueba. La prueba ($J_L = 60$, $J_G = 30$) registró 187 burbujas y 491 burbujas para la prueba ($J_L = 30$, $J_G = 60$). Los valores corresponden al número máximo y mínimo de burbujas contabilizadas. Por esta razón la sonda de impedancia consigue determinar mejores resultados, pues utiliza una distribución estadística de un gran número de burbujas al igual que el modelo teórico, mientras que para el procesamiento de imágenes se seleccionaron 2 burbujas cuyas velocidades podían estar dentro del rango de velocidades de la distribución gaussiana, es decir que estas burbujas podían tener una velocidad mayor, menor o próximas a la velocidad promedio. En otras palabras, los resultados de las imágenes son susceptibles a grandes variaciones dependiendo de las burbujas que se seleccionen.

Por otra parte, se puede ver que para un flujo continuo de pistones de líquido y burbujas alargadas de gas a una misma velocidad superficial de la mezcla, la velocidad del frente de burbuja es mayor para la mezcla que tiene mayor velocidad superficial de gas.

De las observaciones de las imágenes:

EL anexo II muestra para cada caso una imagen del frente de la nariz de la burbuja y una de la parte trasera.

Se puede ver que para los puntos 1 y 2, cuyas velocidades superficiales de la mezcla son iguales (90 cm/s), el tamaño y número de burbujas dispersas en el pistón de líquido, la parte trasera y la película de líquido, es mayor para el punto número uno, el cual presenta una velocidad superficial de gas mayor. Del mismo modo se puede observar para los puntos 3 y 4, cuyas velocidades superficiales de la mezcla son de 180 cm/s.

La densidad de burbujas para todos los casos es mayor en la región de la parte trasera de la burbuja. Se puede ver también que las burbujas dispersas presentan un tamaño menor en la parte trasera que las presentes en el frente de nariz de la burbuja.

Para los puntos 3 y 4, se ve que el perfil del frente de la burbuja deja de presentar una forma parabólica, además se ve que la parte trasera de la burbuja no está bien definida como en los puntos 1 y 2.

Una de las observaciones más importantes es que la burbuja alargada tiende a desplazarse hacia el radio interior de la tubería a medida que se incrementa la velocidad superficial del líquido. Esto se verifica observando el espesor de filme que rodea la burbuja alargada. La parte de la película que se encuentra hacia el radio interior de la tubería disminuye su espesor conforme se aumenta la velocidad superficial del líquido.

Este desplazamiento se presenta también en las burbujas dispersas que se encuentran en el pistón de líquido delante de la nariz de la burbuja. Las burbujas se agrupan hacia el radio interior a medida que se incrementa la velocidad superficial del líquido.

9. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PRA TRABAJOS FUTUROS.

Las medidas de la velocidad determinadas con el procesamiento de imágenes para los experimentos con una única burbuja aislada en movimiento, presentaron valores próximos que se pueden considerar aceptables en relación a los valores dados por el instrumento consagrado por la comunidad científica en la medición de flujos bifásicos. Su eficiencia para medir la velocidad en experimentos con flujo continuo de pistones de líquido y burbujas alargadas de gas se ve limitado por la falta de capacidad para procesar grandes cantidades de burbujas.

Para flujo continuo de pistones de líquido y burbujas alargadas de gas a una misma velocidad superficial de la mezcla, la cantidad de burbujas dispersas se presenta en la mezcla con mayor velocidad superficial de gas. Así mismo, el tamaño de las burbujas dispersas en el pistón de líquido que se encuentran en la región del frente de la burbuja, presentan un tamaño mayor a las burbujas que se encuentran en la parte trasera.

El efecto de la velocidad superficial de líquido se ve reflejado en el movimiento transversal de las burbujas alargadas de gas, estas se desplazan hacia el centro de la tubería a medida que la velocidad superficial de líquido aumenta. De la misma forma sucede para las burbujas dispersas que se encuentran en el pistón de la región del frente de la burbuja alargada. Este comportamiento se atribuye a una ganancia en la fuerza centrífuga de la fase líquida por el incremento en su velocidad.

De forma general el trabajo presenta una gran contribución en el estudio del patrón intermitente implementando una metodología de procesamiento de imágenes que se mostró útil y eficiente en la determinación de la velocidad de las burbujas que puede ser aplicable para otros montajes experimentales y trabajos futuros. Su innovación está en que se desarrolló un algoritmo que extrae el perfil de las burbujas y determina la velocidad del frente de la nariz para tres secciones

diferentes con una interacción sencilla por parte de un usuario. Trabajos anteriores utilizaban el módulo “particle tracking” del programa Motion Studio que conseguía resultados con mucha dispersión y presentaba dificultades para el seguimiento de la nariz de la burbuja. En otros trabajos un usuario identificaba visualmente los puntos del frente de la burbuja imagen a imagen, haciendo la tarea dispendiosa y poco eficiente.

Se presentan a continuación algunas sugerencias para futuros experimentos:

Se deben incrementar el número de burbujas analizadas por procesamiento de imágenes con el fin de obtener una distribución gaussiana al igual que las mediciones hechas con las sondas de impedancia y poder comparar ambas técnicas midiendo el mismo espacio muestral.

Para el tramo horizontal, realizar la filmación en la misma zona donde se encuentra ubicada la estación horizontal con el fin de medir el flujo bajo las mismas características hidrodinámicas.

Desarrollar nuevas técnicas de procesamiento que permitan determinar otros parámetros del flujo, como las longitudes de los pistones de líquido y burbujas alargadas de gas.

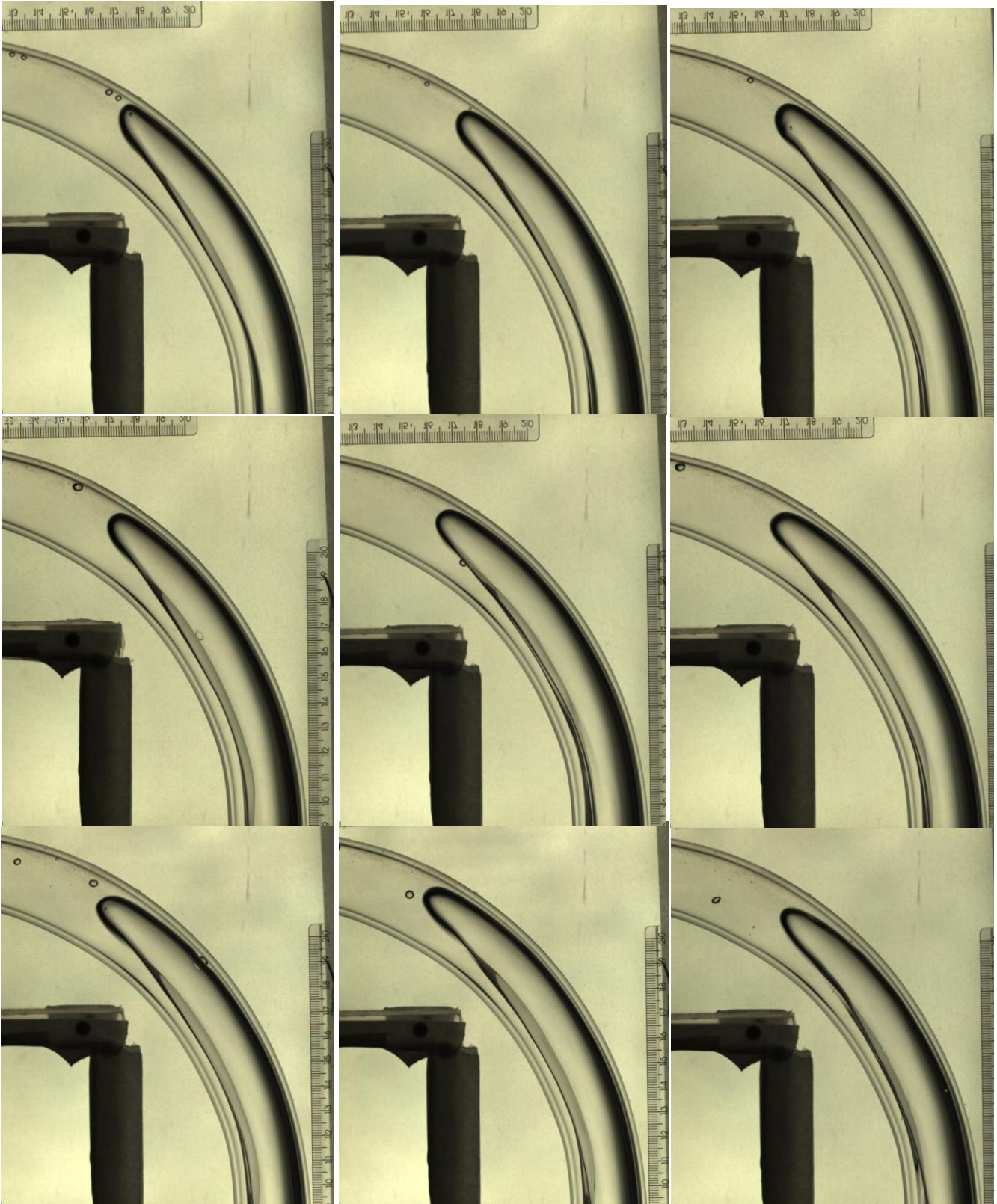
BIBLIOGRAFIA

- BARBOSA, Francisco. Estudio de flujo bifásico patron intermitente em la transición vertical ascendente - horizontal utilizando um modelo slug-tracking. Tesis de maestria. Universidad Estatal de Campinas, SP, 2010.
- BARNEA, D & POLONSKY, S. The relation between the Taylor bubble motion and the velocity field ahead of it. *International Journal of Multiphase Flow*, 25(6-7).1999. p 957–975.
- BENDIKSEN, Kjell. H. An experimental investigation of the motion of the long bubbles in inclined tubes. En: *International Journal of Multiphase Flow*, v. 10, 1984.
- C.E.R. Do AMARAL. Image processing techniques for high-speed videometry in horizontal two-phase slug flows. Em: *Flow Measurement and Instrumentation*. 2013.
- DINH, T. Bui, & CHOI, T. S. Application of image processing techniques to air / water two-phase flow. En: Kwangju Institute of Science and Technology. *Library*, 3808(July),1999.p.725–730.
- FERNANDES, R.C. Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes. En: *AIChE JI* 29,981-989.1983.
- FONSECA, R. Medicón del campo instantaneo de velocidad de líquido en flujo bifásico intermitente em tubos horizontales e inclinados. Tesis de maestria.. Pontifica universidad católica de rio de janeiro.2009
- GÓMEZ, Luis.G. Estudio experimental de escoamientos líquido-gás intermitentes em tuberías inclinadas. Tesis de maestria. Universidad estatal de Campinas, SP, 2010. p.180.
- GUILIZZONI, Manfredo. Flow pattern identification in gas – liquid flows by means of phase density imaging. En: *International Journal of Multiphase Flow*. *International Journal of Multiphase Flow*, 51, 1–10. 2012
- GUET, S. A void fraction in vertical gas-liquid slug flow: Influence of liquid slug content. En: *Chemical engineering science*. v. 61, n. 22, 2006.
- ISMAIL, B., & AHMED, W. Innovative Techniques For Two-Phase Flow Measurements. En: *Recent Patents on Electrical Engineering*. 2008

- MANDHANE Et al. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. En: International Journal of Multiphase Flow 1. 1974. pp. 537-553-
- MASTELARI, N., & ZWANZIGER, M. Sensor for dynamic gas-liquid phase detection in two-phase flows. Tesis de doctorado. Universidad estatal de campinas, SP. 2005.
- MAYOR, T. S., PINTO, A. M. F. R., & CAMPOS. An image analysis technique for the study of gas-liquid slug flow along vertical pipes - associated uncertainty. Em: *Flow Measurement and Instrumentation*, 18(3-4), 139–147. 2007
- MAZZA, R. A., ROSA, E. S., & YOSHIZAWA, C. J. Analyses of liquid film models applied to horizontal and near horizontal gas-liquid slug flows. *Chemical Engineering Science*, 65(12), 3876–3892. 2010
- NICKLIN, D. J., WILKES, J. O. & DAVIDSON, J. F. Two-phase flow in vertical tubes. *Trans. Instn chem Engrs* 40, 1962. p. 61-68.
- Nuryadin, S., Ignaczak, M., Lucas, D., & Deendarlianto.. On the accuracy of wire-mesh sensors in dependence of bubble sizes and liquid flow rates. En: *experimental Thermal and Fluid Science*, 65, 73–81.
- RODRIGUES, Hendy. Simulação numérica do escoamento bifásico gás-líquido no padrão de golfadas utilizando um modelo lagrangeano de seguimento de pistões. Tesis de maestria. Universidad Federal de Paraná, 2009.
- SHOHAM, Ovadia. Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes.: Society of petroleum engineers books committe, 2005. p. 8-16.
- SOUZA, Marco. Caracterización experimental de la fracción de gas en el flujo vertical intermitente gas-líquido. Tesis de doctorado. Universidad Estatal de Campinas, SP, 2013.
- VAN HOUT, R., BARNEA, D., & SHEMER, L. Translational velocities of elongated bubbles in continuous slug flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 28(8), 1333–1350. 2002.
- WAANLACE, R. Estudio experimental de burbujas alargadas em flujo bifásico horizontal intermitente. Teis de maestria . Pontifica universidad católica de rio de janeiro. 2012

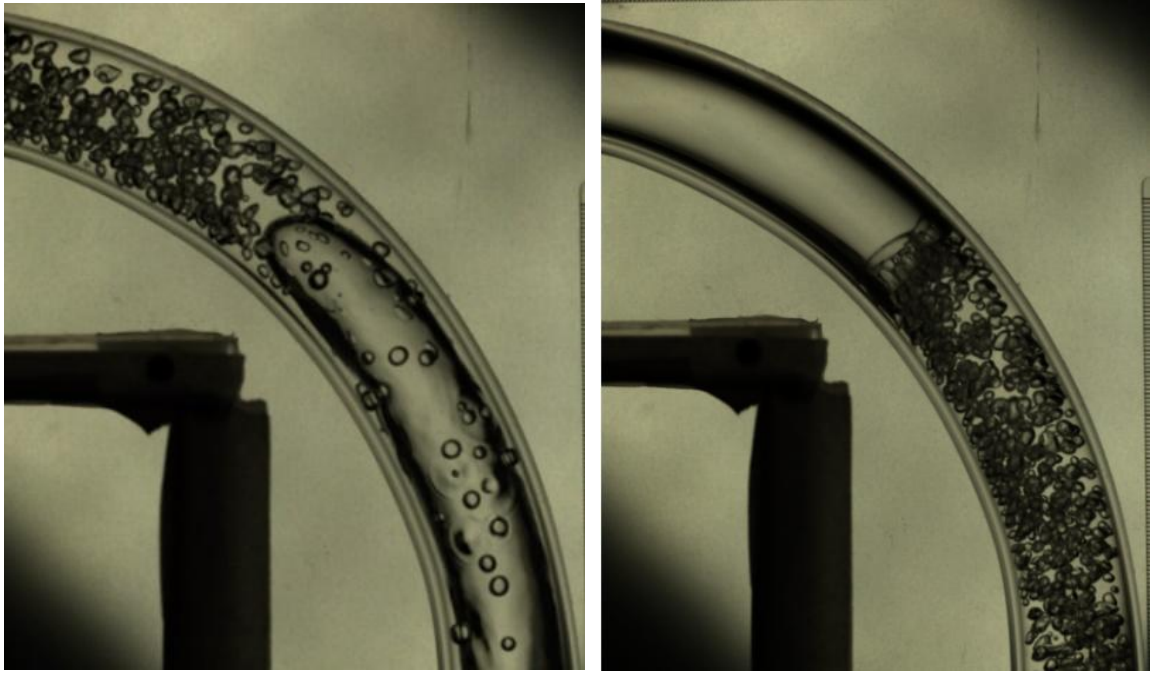
ANEXOS

Anexo A. IMÁGENES DEL FRENTE DE NARIZ DE LA BURBUJA AISLADA EN LA CURVAFLUYENDO A LAS VELOCIDADES SUPERFICIALES DE LA TABLA 6

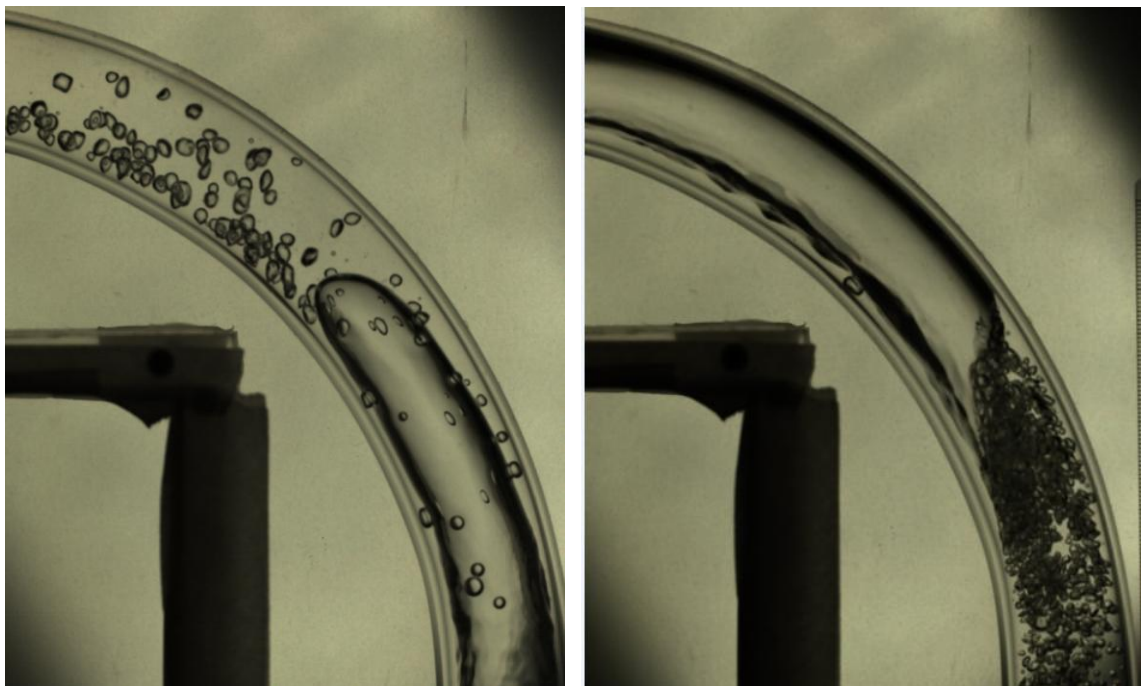


Anexo B. IMÁGENES DEL FRENTE DE BURBUJAY PARTE TRASERA PARA FLUJO DE AMBAS FASES.

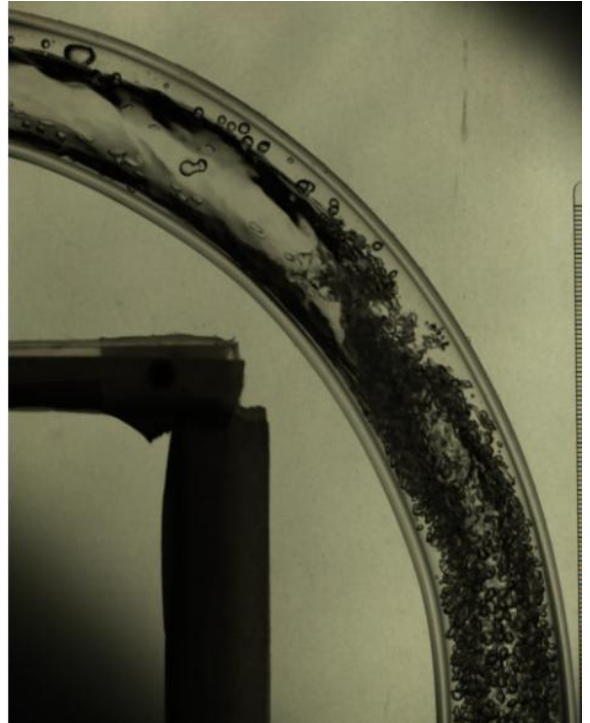
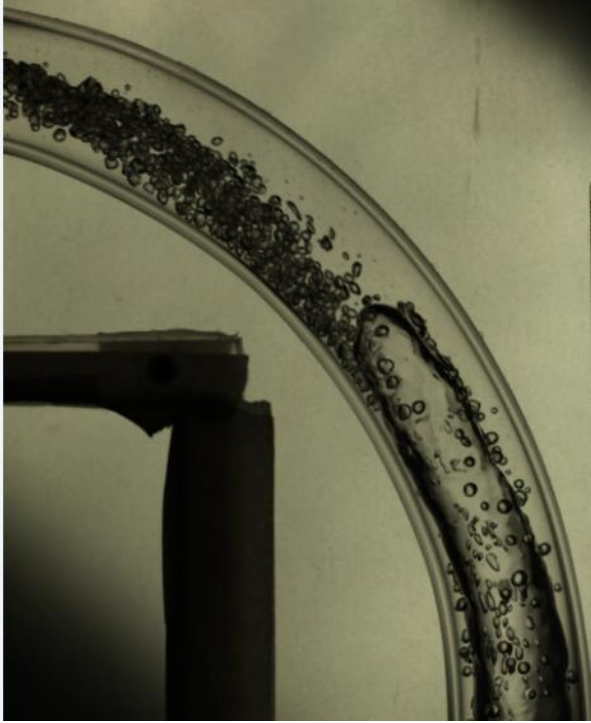
Nº 1. **JL=30 - JG=60** [cm/s]



Nº 2. **JL=60 - JG=30** [cm/s]



N° 3. **JL=90 - JG=90** [cm/s]



N° 4. **JL=120 - JG=60** [cm/s]



Anexo C. GRAFICAS DE RESULTADOS DE LA SONDA DE IMPEDANCIA

$$J_L = 90 \text{ y } J_G = 90$$

NºImagen	Ángulo (grados)	$\Delta\beta$ (grados)	Velocidad[m/s]	Ángulo equivalente	Velocidad promedio [m/s]
1,00	4,29	1,48	2,50		
2,00	5,77	1,48	2,50		
3,00	7,25	1,87	3,16		
4,00	9,13	1,44	2,43		
5,00	10,57	1,45	2,45		
6,00	12,01	1,60	2,71		
7,00	13,62	1,37	2,31		
8,00	14,99	1,59	2,68	15°	
9,00	16,58	1,48	2,50		
10,00	18,06	2,55	4,30		
11,00	20,61	0,64	1,08		
12,00	21,25	1,47	2,48		
13,00	22,72	2,69	4,55	22,5°	2,42
14,00	25,41	1,58	2,67		
15,00	26,99	1,60	2,71		
16,00	28,60	1,56	2,64		
17,00	30,16	1,52	2,57	30°	
18,00	31,68	1,55	2,62		
19,00	33,24	1,54	2,59		
20,00	34,77	1,59	2,69		
21,00	36,37	1,54	2,60		
22,00	37,91	1,40	2,36	37,5°	2,54
23,00	39,30	1,60	2,70		
24,00	40,90	1,41	2,38		
25,00	42,31	1,44	2,43		
26,00	43,75	1,48	2,50		
27,00	45,23	1,50	2,53	45°	
28,00	46,73	1,50	2,53		
29,00	48,23	1,38	2,32		
30,00	49,61	1,28	2,16		
31,00	50,88	1,53	2,58		
32,00	52,41	1,29	2,19	52,5°	2,32
33,00	53,71	1,08	1,82		
34,00	54,79	1,26	2,13		

35,00	56,05	1,43	2,42		
36,00	57,48	1,42	2,39		
37,00	58,89	1,39	2,35		
38,00	60,29	1,43	2,42	60°	
39,00	61,72	1,72	2,91		
40,00	63,44	1,70	2,86		
41,00	65,14	1,20	2,02		
42,00	66,34	0,95	1,60		
43,00	67,28	2,00	3,38	67,6°	2,30
44,00	69,28	1,34	2,26		
45,00	70,62	1,38	2,33		
46,00	72,00	1,20	2,02		
47,00	73,20	0,00	0,00	75°	

Anexo D EXPLICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES DEL FRENTE DE BURBUJA.

El programa se divide en tres módulos, uno para cada tramo de análisis. En cada uno de ellos hay dos secciones, en la primera se procesan las imágenes para obtener los perfiles de las burbujas y en la segunda se determina la velocidad del frente de las burbujas. A continuación se presentan el manual de uso de esta interfaz.

El primer paso es organizar las carpetas de las imágenes que se van a procesar y nombrar todas las imágenes "Im (X)" para que el programa pueda reconocerlas. En donde X representa una secuencia de números (1, 2, 3, 4,5,..). Esto se realiza seleccionando todas las imágenes correspondientes a una misma prueba y nombrando la primera de ellas como "Im", windows automáticamente colocará la numeración para todas las imágenes.

- Se ejecuta el archivo "Ainicio.m " desde MatLab y se da "run" para abrir la interfaz de inicio (figura 60).

Figura 60. Menú principal herramienta computacional



- Se selecciona el módulo dependiendo del tramo en el que se desean analizar las imágenes.

En cada módulo se encuentran tres divisiones:

Parámetros escala y frecuencia:

En esta sección se indica la dirección de la carpeta que contiene las imágenes que se van a procesar, la frecuencia de adquisición de imágenes, la escala ε y los parámetros iniciales necesarios para cada tramo de acuerdo a lo mencionado en el capítulo 6.

Una grafica presente en cada módulo muestra los parametros ajustados por el usuario para facilitar el proceso. El boton “VER” se encarga de actualizar los valores y presentarlos en la grafica.

Selección filtro:

En esta sección se indican los valores de los parámetros utilizados para ejecutar el filtro. En esta ventana se prueban los parámetros en diferentes imágenes hasta obtener las combinaciones que presenten los mejores resultados para posteriormente aplicarlo a todo el grupo de imágenes. La tabla 8 del capítulo 4 muestra dos combinaciones que consiguieron los mejores resultados.

El botón “VISUALIZAR FILTRO” lee estos parámetros, ejecuta el filtro y presenta el perfil obtenido sobre la imagen original en la gráfica. Para visualizar únicamente el perfil se da selecciona en la opción “Check Box” y se da clic nuevamente en “VISUALIZAR FILTRO”.

Ejecutar filtro:

Aquí se indican el número de la imagen inicial y final del grupo de imágenes a las cuales se va a aplicar este filtro. Los resultados de este proceso son almacenados en la misma carpeta que contiene las imágenes originales.

El botón “SALVAR E EJECUTAR” ejecuta el filtro y despliega una ventana que muestra la evolución del proceso.

Una vez determinados los perfiles de las burbujas se da clic en “SALVAR VALORES Y CALCULAR VELOCIDAD” para abrir el módulo para calcular la velocidad promedio del frente de la burbuja.

Este módulo muestra los parámetros seleccionados en el módulo anterior y se indican las coordenadas Y_m y X_m para el caso de la sección vertical y horizontal, para el tramo curvo se debe indicar el radio medio de traslación de la burbuja utilizando una gráfica presente en el módulo como ayuda para determinar su valor.

El módulo de la sección vertical y horizontal muestra como resultado el valor medio de la velocidad. El módulo de la sección curva muestra la tabla de la velocidad del frente de nariz de burbuja en los diferentes ángulos a lo largo de la tubería.

A continuación se presenta la interfaz durante el procesamiento para las diferentes secciones.

TRAMO VERTICAL

Figura 61. Interfaz sección vertical en configuración de parámetros de escala y frecuencia

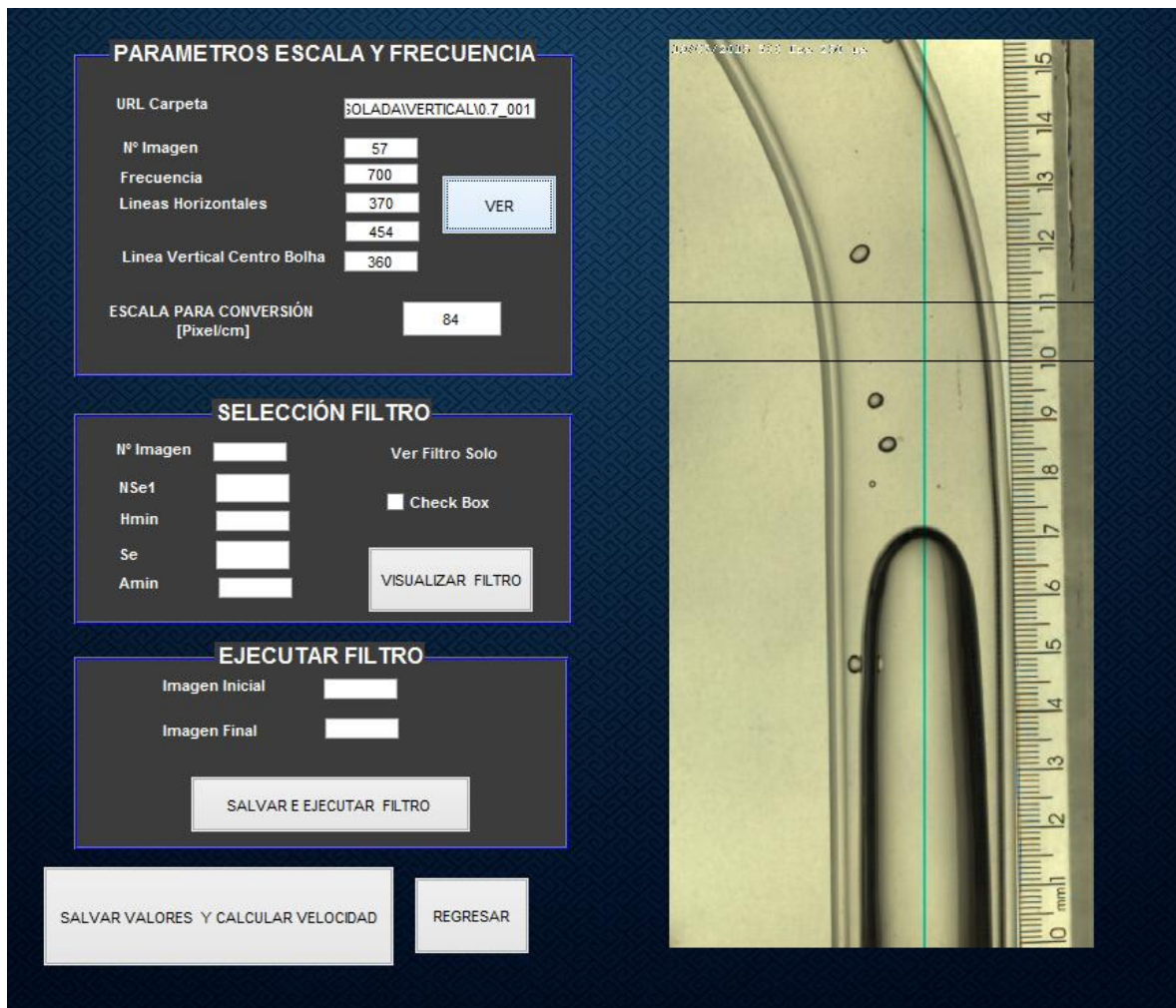


Figura 62. Interfaz sección vertical para selección de parámetros del filtro



i

La figura 63 muestra la barra que indica la evolución del procesamiento de imágenes.

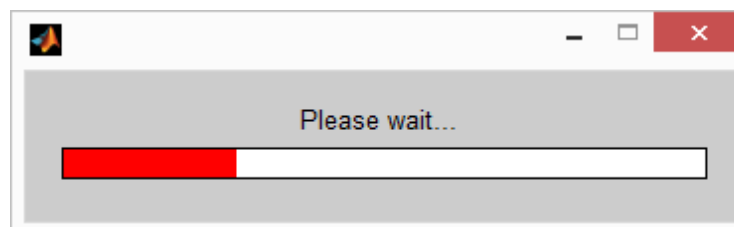


Figura 63. Barra indicadora de la evolución del procesamiento de imágenes.

La figura 64 muestra los resultados obtenidos para una burbuja aislada en la tubería vertical con líquido fluyendo a $Q_L = 0,8 \text{ m}^3/h$

Figura 64. Interfaz de resultados burbuja aislada tubería vertical

The interface is titled "Vertical_Calculos" and is divided into two main sections: "VALORES ESTABLECIDOS" (Established Values) and "RESULTADOS" (Results).

VALORES ESTABLECIDOS:

- Frecuencia: 700
- Escala: 84
- Linea Vertical Centro Bolha: 360
- Imagen Inicial: 9
- Imagen Final: 63
- Valores distancia en pixeles para hacer promedio: X=5, Y=5

RESULTADOS:

Velocidad Promedio: 87.0628 [cm/s]

	Posicion en Y	Posicion Media en Y	Desplazamiento [mm]	Velocidad [cm/s]	Velocidad [m/s]
8	0	0	0	0	0
9	1203	1.2022e+03	10.9167	90.9722	0.9097
10	1192	1.1913e+03	9.9167	82.6389	0.8264
11	1182	1.1813e+03	10.1667	84.7222	0.8472
12	1172	1.1712e+03	10.3810	86.5079	0.8651
13	1162	1.1608e+03	10.2473	85.3938	0.8539
14	1152	1.1505e+03	10.2051	85.0427	0.8504
15	1141	1.1403e+03	10.6410	88.6752	0.8868
16	1131	1.1297e+03	10.3590	86.3248	0.8632
17	1120	1.1193e+03	10.0833	84.0278	0.8403
18	1110	1.1093e+03	10.6346	88.6218	0.8862
19	1100	1.0986e+03	10.3654	86.3782	0.8638
20	1089	1.0883e+03	10.6346	88.6218	0.8862
21	1079	1.0776e+03	10.4725	87.2711	0.8727
22	1069	1.0671e+03	10.6044	88.3700	0.8837
23	1058	1.0565e+03	10.8462	90.3846	0.9038
24	1047	1.0457e+03	10.6923	89.1026	0.8910
25	1037	1035	10.0769	83.9744	0.8397
26	1026	1.0249e+03	10.3077	85.8974	0.8590
27	1016	1.0146e+03	10.5385	87.8205	0.8782
28	1005	1.0044e+03	10.7108	90.2315	0.9023

Buttons: REGRESAR, Limpiar Valores, CALCULAR

TRAMO HORIZONTAL

Figura 65. Interfaz sección horizontal en configuración de parámetros de escala y frecuencia.

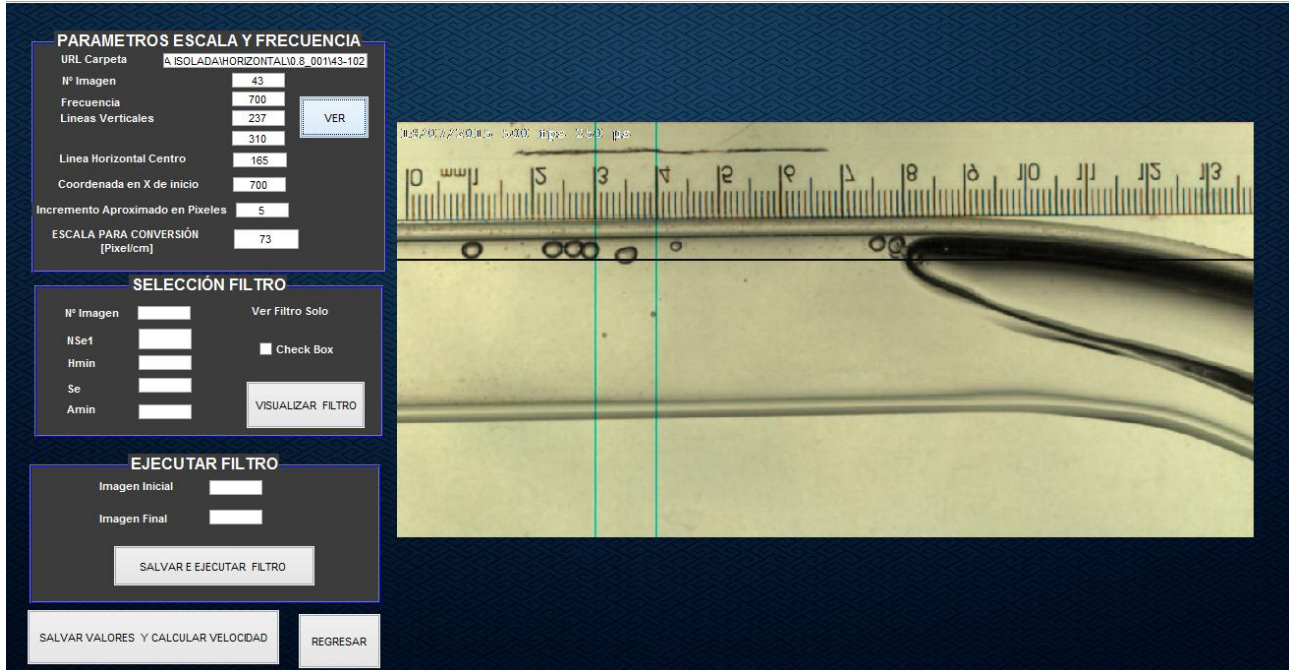
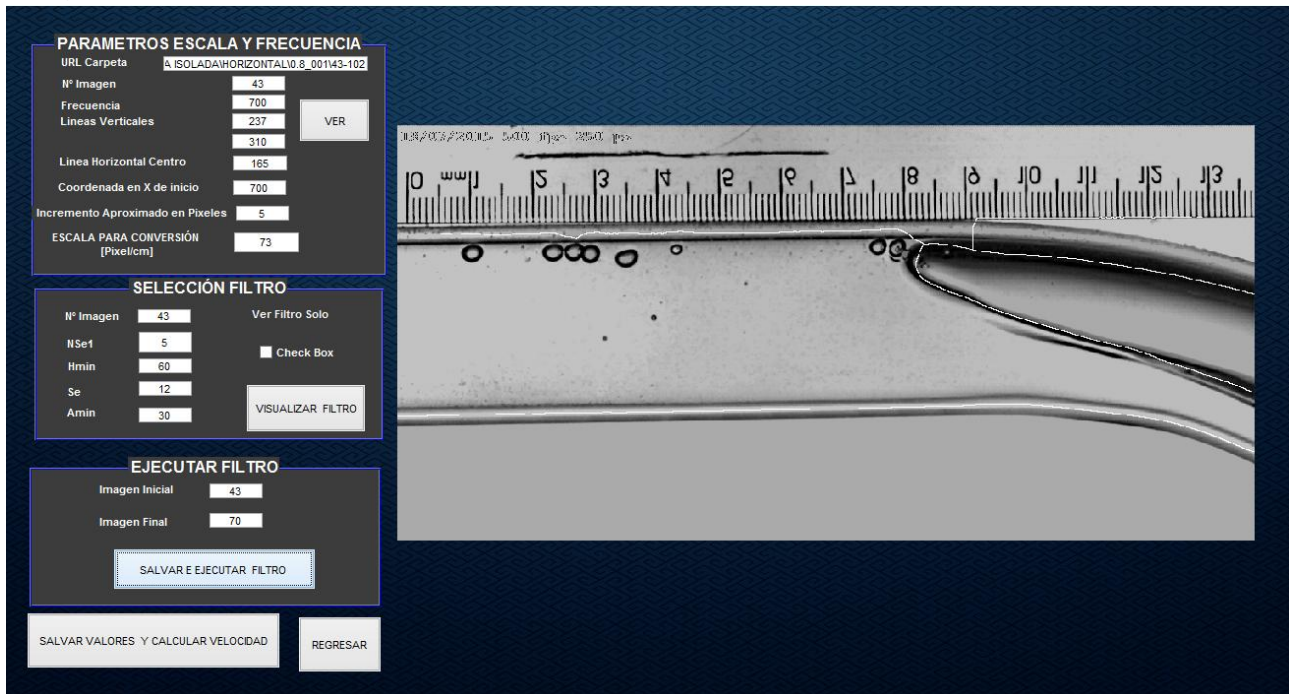


Figura 66. Interfaz sección horizontal para selección de parámetros del filtro



La figura muestra los resultados obtenidos para una burbuja aislada fluyendo en la sección horizontal con líquido fluyendo a $Q_L = 0,8 \text{ m}^3/h$

Figura 67. Interfaz de resultados burbuja aislada tubería horizontal.

Horizontal_Calculos

VALORES ESTABLECIDOS

Frecuencia: 700

Escala: 73

Linea Horizontal Centro Bolha: 165

Coordenada en X de inicio: 700

Incremento Aproximado en Pixeles: 5

Imagen Inicial: 43

Imagen Final: 63

Valores distancia en pixeles para hacer promedio

X: 4 Y: 4

CALCULAR

RESULTADOS

Velocidad Promedio 86.6565 [cm/s]

	Posicion en Y		Desplazamiento	Velocidad [cm/s]	Velocidad [m/s]
42	0	0	0	0	0
43	673	670.6667	8.8333	84.7032	0.8470
44	664	661.8333	8.8333	84.7032	0.8470
45	655	653	9.2857	89.0411	0.8904
46	646	643.7143	8	76.7123	0.7671
47	638	635.7143	8	76.7123	0.7671
48	630	627.7143	5.8810	56.3927	0.5639
49	624	621.8333	7.1667	68.7215	0.6872
50	617	614.6667	8.6667	83.1050	0.8311
51	608	606	10	95.8904	0.9589
52	598	596	11.3333	108.6758	1.0868
53	587	584.6667	8.6667	83.1050	0.8311
54	578	576	8	76.7123	0.7671
55	570	568	5.3333	51.1416	0.5114
56	565	562.6667	5.6667	54.3379	0.5434
57	559	557	10	95.8904	0.9589
58	549	547	11	105.4795	1.0548
59	538	536	12	115.0685	1.1507

REGRESAR

Limpiar Valores

TRAMO CURVO

Figura 68. Interfaz sección curva en configuración de parámetros de escala y frecuencia

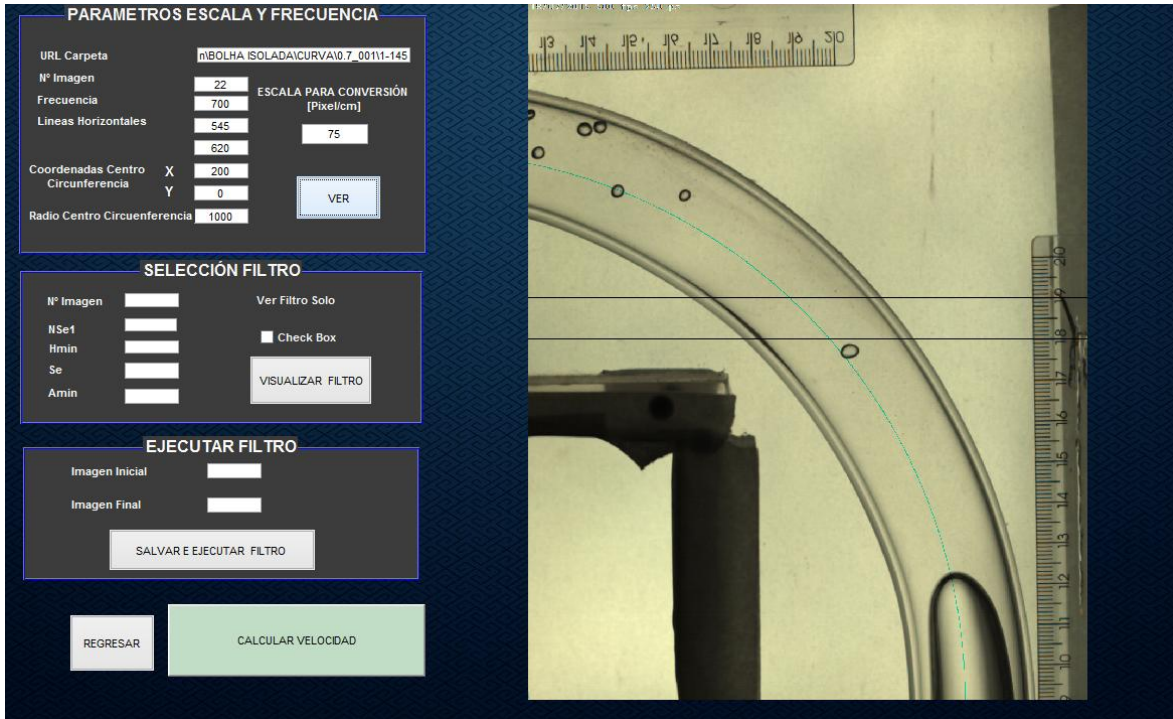
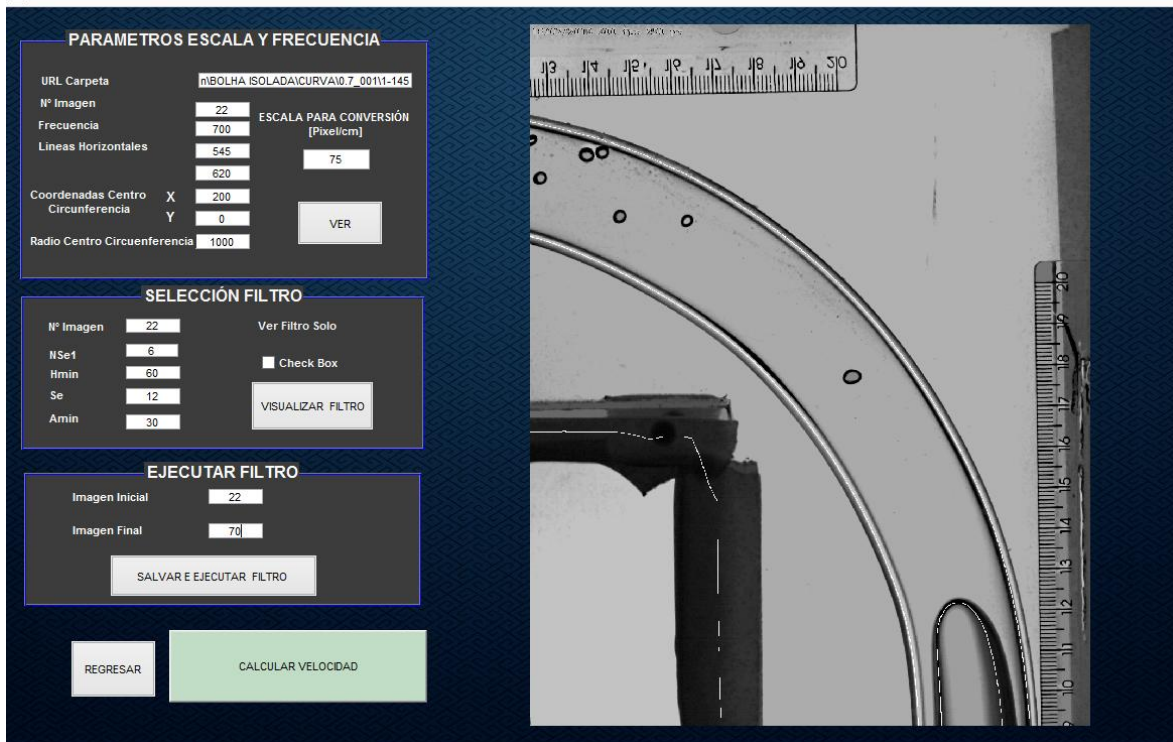


Figura 69. Interfaz de la sección curva para selección de parámetros del filtro



La figura muestra los resultados obtenidos para una burbuja aislada fluyendo en la curvatura con liquido fluyendo a $Q_L = 0,8 \text{ m}^3 / \text{h}$

Figura 70. Interfaz de resultados burbuja aislada en la sección curva.

