



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**ANÁLISIS DIGITAL DE BURBUJAS EN LECHO FLUIDIZADO MEDIANTE
VIDEO EN LA BANDA VISNIR**

POR

Ignacio Andres Roa Campos

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Electrónico

Profesor Guía
Sergio Torres Inostroza

2024
Concepción (Chile)

©2024 Ignacio Andres Roa Campos

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

**“Si no veo en sus manos los agujeros de los clavos y si no meto mi mano en la herida
de su costado, no creeré.”**

Juan 20:25

Sumario

Un reactor de lecho fluidizado es un reactor químico el cual utiliza un fluido, sea gas o líquido, para lograr que un material particulado, como minerales, concentrados metálicos, materiales orgánicos, y un extenso etc, logre alcanzar propiedades físicas similares a las de un fluido. Esto determina que el sistema fluido – material particulado alcancen una muy buena transferencia de calor y masa lo que permite que sistemas reactivos tengan una alta eficiencia de las reacciones químicas que ocurran en el reactor. Por esta razón, este reactor es utilizado en distintas industrias como los procesos de metalurgia química, tratamiento de alimentos, industria farmacéutica, refinación de petróleo, entre otras. Resulta natural buscar monitorear estos reactores para tener un buen diagnóstico del proceso químico que tiene lugar en el reactor midiendo la mayor cantidad de variables involucradas para de esta manera controlar la operación y hacerla lo más eficiente posible.

En este marco conceptual, este trabajo estudia la viabilidad de medir la morfología, frecuencia de ruptura y distribución de las burbujas formadas en un reactor de lecho fluidizado. Para lograr este objetivo se utilizó un sistema de visión al interior de un reactor de laboratorio donde a través de una mirilla instalada en la tapa superior de este se tuvo acceso visual a la superficie de un lecho operando a temperaturas de 800°C. La captura de las imágenes consideró el uso de una cámara VISNIR logrando así capturar videos del comportamiento de las burbujas en la superficie en diferentes condiciones operacionales del reactor. Para las pruebas se utilizó aire como gas de fluidización y dos cargas de sílice seca llegando a temperaturas superiores a los 800°C. Posteriormente, se analizan manualmente los videos para identificar y medir las propiedades de las burbujas.

Como principal resultado se destaca la confirmación que es posible visualizar burbujas en el lecho del reactor logrando calcular su diámetro, en que porción del reactor están apareciendo y su frecuencia de ruptura. Sin embargo, la nitidez y facilidad con la que son identificadas depende de varios parámetros del reactor como la temperatura de operación, caudal de entrada del gas o tipo de material particulado cargado en él. Este informe analiza dos de estos parámetros, quedando como estudio a futuro realizar pruebas con otro tipo de carga.

Summary

A fluidized bed reactor is a chemical reactor that uses a fluid, whether gas or liquid, to make a particulate material—such as minerals, metal concentrates, organic materials, and many others—achieve physical properties similar to those of a fluid. This allows the fluid-particulate material system to achieve excellent heat and mass transfer, enabling highly efficient chemical reactions within the reactor. For this reason, this type of reactor is used in various industries, including chemical metallurgy processes, food processing, the pharmaceutical industry, petroleum refining, and more. Naturally, monitoring these reactors is essential to obtain a proper diagnosis of the chemical process occurring inside by measuring as many relevant variables as possible. This, in turn, allows for effective control of the operation to maximize efficiency.

Within this conceptual framework, this study examines the feasibility of measuring the morphology, breakup frequency, and distribution of bubbles formed in a fluidized bed reactor. To achieve this objective, a vision system was implemented inside a laboratory-scale reactor, where a viewport installed on the top cover provided visual access to the surface of a bed operating at 800°C. Image capture involved the use of a VISNIR camera, allowing video recording of bubble behavior on the surface under different reactor operating conditions. Air was used as the fluidizing gas during the tests, and two batches of dry silica were loaded, reaching temperatures above 800°C. The recorded videos were then manually analyzed to identify and measure the properties of the bubbles.

The main result confirms that it is possible to visualize bubbles in the reactor bed and determine their diameter, location within the reactor, and breakup frequency. However, the clarity and ease of identification depend on several reactor parameters, such as operating temperature, gas flow rate, and the type of particulate material used. This report analyzes two of these parameters, leaving further studies to explore tests with different types of material loads.

Índice General

Índice General.....	vi
Índice de figuras	vii
Nomenclatura.....	xii
1. Introducción	1
2. Objetivo general y objetivos específicos.....	2
3. Marco Teórico	3
3.1. Reactor de lecho fluidizado	3
3.2. Field of view y cálculo de área	9
3.3. Optical Flow por método de Lucas-Kanade.	10
4. Setup de laboratorio	11
5. Pruebas de laboratorio.....	18
5.1. Prueba 1: 20/01/2025	19
5.2. Prueba 2: 23/01/2025	19
5.3. Prueba 3: 28/01/2025	41
5.4. Análisis de Optical flow.....	50
Conclusión.....	52
Referencias	53

Índice de figuras

Figura 2.1 Regímenes de fluidización en función de U [1]..	Error! Marcador no definido.
Figura 2.2 Identificación grafica de la velocidad mínima de fluidización [1]	4
Figura 2.3 Diferentes tipos de slugs [1].....	6
Figura 2.4 Secuencia de ascenso y separación entre slugs [1]	7
Figura 2.5 Descomposición del FOV [5].....	9
Figura 3.1 Dimensiones de DCC15645C [7].....	11
Figura 3.2 Sensibilidad relativa y Eficiencia cuántica [7]	12
Figura 3.3 Sistema de refrigeración.....	13
Figura 3.4 Foto de caracterización sin mirilla	14
Figura 3.5 Foto de caracterización con mirilla	14
Figura 3.6 Montaje y dimensiones del reactor	16
Figura 3.7 Plato de Tobera n1 con $Nor=38$	16
Figura 3.8 Sensor diferencial de presión	17
Figura 4.1 Diferencial de presión general	20
Figura 4.2 Frame de un lecho estático.....	20
Figura 4.3 Diferencial de presión mientras su aumenta el caudal	21
Figura 4.4 Primer frame con burbujas	21
Figura 4.5 Histograma a $U=0.055$ m/s	23
Figura 4.6 Los 4 primeros frames.....	24
Figura 4.7 Aparición de la burbuja en el frame 7	24
Figura 4.8 Aparición de la segunda burbuja en el frame 8	25
Figura 4.9 Frame 17 con la medida de la burbuja	25
Figura 4.10 Frame 10 y 12.....	26
Figura 4.11 Frame 6 y 15.....	26
Figura 4.12 Frame 17 y 22.....	26
Figura 4.13 Frame 3 y 22.....	27
Figura 4.14 Frame 8 y 11.....	27
Figura 4.15 Frame 14 y 21.....	28
Figura 4.16 Frame 22 con la aparición de dos burbujas pequeñas	28
Figura 4.17 Frame 18 y 24.....	29

Figura 4.18 Frame 6 donde la burbuja alcanza el tamaño máximo	29
Figura 4.19 Frame 6 a 11	30
Figura 4.20 Frame 14 y 19.....	30
Figura 4.21 Frame 17 y 20.....	30
Figura 4.22 Diferencial de presión a $U=U_{mf}$	32
Figura 4.23 Frame donde se aprecia una sola burbuja	33
Figura 4.24 Histograma a $U=0.068$ m/s	33
Figura 4.25 Frame 6 y 9.....	34
Figura 4.26 Frame 1 y 3.....	34
Figura 4.27 Frame 17 y 19.....	35
Figura 4.28 Frame 20 y 21.....	35
Figura 4.29 Frame 14 y 15.....	36
Figura 4.30 Frame 16 y 17.....	36
Figura 4.31 Frame 24 y 25.....	36
Figura 4.32 Frame 8 y 10.....	37
Figura 4.33 Frame 17 y 18.....	37
Figura 4.34 Frames donde aún es visible	39
Figura 4.35 Frame donde la termocupla es apenas visible y donde la mirilla es obstruida por completo	39
Figura 4.36 Temperatura en la zona de reacción 1 para la prueba 1	40
Figura 4.37 Temperatura en la zona de reacción 2 para la prueba 1	40
Figura 4.38 Temperatura en la zona 2 para la prueba 3	41
Figura 4.39 Temperatura en la zona 2 para la prueba 3	41
Figura 4.40 Frame a $U=8$ Lpm.....	42
Figura 4.41 Frame para determinar U_{mf}	42
Figura 4.42 Histograma para $U=0.028$ m/s	43
Figura 4.43 Frames de la prueba 2 y 3	43
Figura 4.44 Desviación estándar con la imagen dividida en dos.....	44
Figura 4.45 Selección de las nuevas regiones de interés	44
Figura 4.46 Desviación estándar de las dos regiones de interés.....	45
Figura 4.47 Histograma para un régimen de slugs	45

Figura 4.48 Frame 9 y 11.....	46
Figura 4.49 Frame 22 y 23.....	46
Figura 4.50 Frame 13 y 14.....	47
Figura 4.51 Frame 9 y 10.....	47
Figura 4.52 Régimen turbulento	49
Figura 4.53 Secuencia de frames desde 19 al 22	50
Figura 4.54 Vectores de flujo en el frame 22.....	51

Índice de tablas

Tabla 4.1 Especificaciones técnicas de DCC15645C	11
Tabla 4.2 Resultados para lente de 35mm	12
Tabla 4.3 Resultados para lente de 50mm	12
Tabla 4.4 Resultados de la caracterización	15
Tabla 4.5 Ficha técnica del sensor de presión.....	17
Tabla 5.1 Datos de la carga P2.....	19
Tabla 5.2 Comparación de resultados de mínima fluidización.....	22
Tabla 5.3 Modelo para $U=0.055\text{m/s}$	22
Tabla 5.4 Resultados de la prueba 2	40
Tabla 5.5 Datos de la carga P3.....	41
Tabla 5.6 Resultados para el régimen de slug P3	49

Índice de ecuaciones

$Umf = 0.00061 * g * ps - pg * dp2u$	(1)	4
$dbh = dbm - dbm - db0e - 0.3hD$	(2).....	5
$dbm = 2.59 * U - Umf * Ag0.50.4$	(3).....	5
$db0 = 1.38 * U - Umf * Ag0.5 * Nor0.4$	(4).....	5
$ubh = 0.711g * db(h) + U - Umf$	(5)	6
$Ums = Umf + 0.07g * D$	(6)	6
$de \geq 0.5 * D$	(7).....	6
$us0 = 0.35 * g * D$	(8).....	7
$us = us0 + k * U - Umf$	(9).....	7
$\lambda sD - 0.4951 + \beta \lambda sD + 0.061 - 1.94 * \beta = 0$	(10)	8
$Con \beta = U - Umfus0$	(11).....	8
$fs = us\lambda s + 2D$	(12).....	8
$Hmax = U - Umfus + 1 * Hmf$	(13).....	8
$H = Hmf * ubub - YU - Umf$	(14).....	8
$FOV = 2 * arctanb2 * f$	(15).....	9
$x = 2 * d * tanHFOV2$	(16)	9
$y = 2 * d * tanVFOV2$	(17).....	9
$objeto estimadomm = objetopxsensorpx * x, ymm$	(18)...	9
$Ix, y, t = Ix + dx, y + dy, t + dt$	(19).....	10
$Ix + dx, y + dy, t + dt = Ix, y, t + dIdx * \partial x + dIdy * \partial y + dIdt * \partial t$	(20).	10
$Ix * Vx + Iy * Vy = -It$	(21).....	10
$Ixx1, y1Iyx1, y1 :: Ixxn, ynIyxn, yn * vxvy = Itx1, y1 : Itxn, yn$	(22) ..	10
$AT * A * v = b$	(23) ..	10
$v = AT * A - 1 * AT * b$	(24) ..	10

Nomenclatura

A: Área transversal del reactor.

Ar: Numero de Arquímedes.

D: Diámetro del reactor.

d: distancia cámara objeto.

d_b : Diámetro de la burbuja estimado por el modelo.

d_{b0} : Diámetro de la burbuja a la salida de la tobera.

d_{bm} : Diámetro de la burbuja si existiera coalescencia sin restricción.

d_e : Diámetro estimado de la burbuja mm.

f: distancia focal en mm.

f_r : Frecuencia de ruptura de una burbuja en s^{-1} .

f_s : Frecuencia entre slugs axialmente simétricas en s^{-1} .

FOV: Field of view o campo de visión de la cámara.

g: Fuerza de gravedad m/s^2 .

h: Altura del lecho en m.

H_{mf} : Altura de la carga en régimen estático en m.

Nor: Número de entradas de aire en la tobera.

p_g : densidad del gas en kg/m^3 .

p_s : densidad del solido en kg/m^3 .

U: Velocidad superficial del fluido en m/s.

U_b : Velocidad de ascenso de una burbuja en m/s.

U_{mb} : Velocidad mínima de burbujeo en m/s.

U_{mf} : Velocidad mínima de fluidización en m/s.

λ_s : Altura de un slug axialmente simétrico

1. Introducción

Los reactores de lecho fluidizado son una tecnología clave en diversas industrias debido a su capacidad para optimizar la transferencia de calor y masa en sistemas reactivos. Estos reactores utilizan un fluido, ya sea gas o líquido, para hacer que un material particulado, como minerales, adquiera propiedades físicas similares a las de un fluido. Esto mejora significativamente la eficiencia de las reacciones químicas que ocurren en su interior. Debido a sus ventajas, los reactores de lecho fluidizado son ampliamente utilizados en sectores como la metalurgia química, el tratamiento de alimentos, la industria farmacéutica y la refinación de petróleo. Al momento en el que el fluido entra el material presenten en el reactor se forman burbujas que recorren el material hasta alcanzar la superficie. En este contexto, surge la necesidad de evaluar la viabilidad de medir aspectos clave del comportamiento de las burbujas, como la morfología de las burbujas, su frecuencia de ruptura y su distribución dentro del reactor ya que estas al recorrer el material y ser las responsables de fluidizarlo su comportamiento nos entregara información sobre la eficiencia de la operación.

Este estudio tiene como propósito analizar la morfología, la frecuencia de ruptura y la distribución de las burbujas en un reactor de lecho fluidizado. Para ello, se diseñó un sistema experimental en un reactor de laboratorio, incorporando una mirilla en la tapa superior que permitió la observación directa del lecho a temperaturas de hasta 850°C. La captura de imágenes se realizó mediante una cámara VISNIR, lo que permitió registrar videos del comportamiento de las burbujas bajo diferentes condiciones operacionales. Durante los ensayos, se utilizó aire como gas de fluidización y se emplearon dos cargas de sílice seca. Posteriormente, se llevó a cabo un procesamiento y análisis manual de los videos para identificar y cuantificar las propiedades de las burbujas.

2. Objetivo general y objetivos específicos

El objetivo principal de esta tesis es estudiar la factibilidad de analizar el comportamiento de las burbujas en la superficie de un reactor de lecho fluidizado por medio de una cámara VISNIR. Mientras que los objetivos específicos son los siguientes:

- 1) Estimar diámetro de las burbujas.
- 2) Estimar frecuencia de ruptura de las burbujas.
- 3) Tasa y zona de aparición de las burbujas.

3. Marco Teórico

3.1. Reactor de lecho fluidizado

El proceso de lechos fluidizados es ampliamente utilizado pasando desde la industria de procesamiento de alimentos, síntesis química hasta el tratamiento de minerales. En el reactor se encuentra presente un sólido particulado al cual se le inyecta un agente de fluidización, puede ser un gas o líquido, mediante unas toberas instaladas en la parte inferior del reactor donde se forman burbujas que lo recorrerán hasta alcanzar la superficie y reventar. El hecho que estas burbujas recorran el sólido hace que este aumente su eficiencia en la transferencia de masa y calor facilitando así las reacciones químicas necesarias, en otras palabras, al fluidizar un sólido particulado logramos que este obtenga propiedades físicas similares a las de un fluido. Para este estudio contamos con un reactor de tipo gas-sólido, donde utilizamos aire como agente de fluidización. Éste puede operar en distintos regímenes de flujo hidrodinámico tales como, régimen de fluidización mínima, lecho burbujeante, régimen de slugging, régimen turbulento, régimen de rápida fluidización y régimen de tipo jet. El régimen de operación está dictado principalmente por la velocidad superficial del gas (U) como podemos ver en la siguiente figura [1].

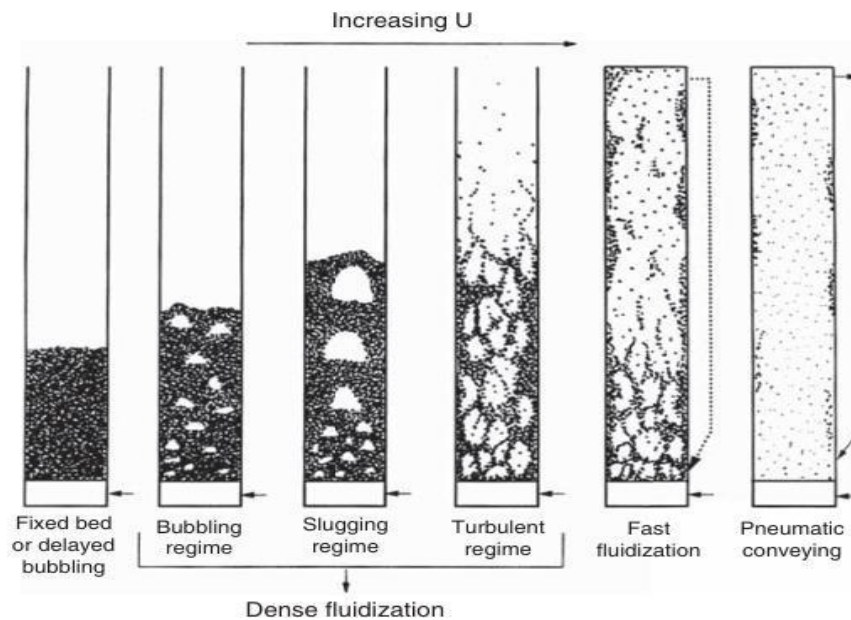


Figura 3.1 Regímenes de fluidización en función de U [1]

Para comenzar la fluidización de un sólido existe una velocidad mínima al cual el gas debe alcanzar, esta es conocida como velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) a esta velocidad el reactor entrara en su primer régimen, mencionado anteriormente como régimen de mínima fluidización. Existen dos métodos para determinar U_{mf} , sin embargo, el mas utilizado y recomendado es mediante un análisis en la variación del diferencial de presión que se genera en el reactor a medida que U aumenta. Esto queda explicado en la siguiente figura [1].

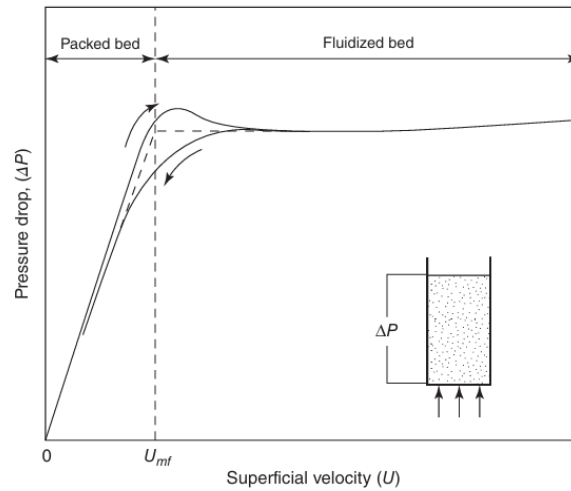


Figura 3.2 Identificación grafica de la velocidad mínima de fluidización [1]

Es posible también calcular U_{mf} mediante la siguiente ecuación para un numero de Arquímedes $\Rightarrow 10^3$ [1]:

$$U_{mf} = \frac{0.00061 * g * (p_s - p_g) * dp^2}{u} \quad (1)$$

Con g como la fuerza de gravedad, p_s y p_g las densidades del sólido y del gas respectivamente, u como la viscosidad del aire y dp el diámetro de la partícula. Una vez fluidizado el contenido del reactor podemos alcanzar los distintos regímenes mencionados simplemente con aumentar o disminuir la velocidad del gas (U). Para este estudio nos centramos en el régimen burbujeante y slugging, los cuales cuentan cada uno con formas distintas para estimar propiedades como su velocidad mínima que el gas debe alcanzar, diámetro de las burbujas, velocidad de acenso de las burbujas, frecuencia de las burbujas, entre otras. Algo más a tener en consideración

es el grupo de clasificación de Geldart al que pertenece el material presente en el reactor. Esto depende tanto del su diámetro promedio como la densidad del material, en este estudio utilizamos un particulado con un diámetro ponderado de unos de $383\mu m$ y una densidad de $1.4g/m^3$ lo que indica que pertenece al grupo B de Geldart [2].

En el caso del régimen burbujeante, este comienza a una velocidad superficial conocida como velocidad mínima de burbujeo (U_{mb}), la cual en el caso de partículas pertenecientes al grupo B tiene el mismo valor que U_{mf} . Para la estimación del diámetro de una burbuja y de su velocidad de ascenso existen varios modelos que se han desarrollado y estudiado durante los años. La precisión de estos modelos va variando según el tipo de lecho y particulado utilizado. En nuestro caso el modelo más utilizado es el desarrollado por S. Mori y C. Y. Wen tanto para la estimación del diámetro como la velocidad de ascenso. Estos modelos están en función de la distancia a la cual se encuentra la burbuja con respecto a la tobera (h). El modelo para el diámetro es el siguiente [1] [2]:

$$d_b(h) = d_{bm} - (d_{bm} - d_{b0})e^{\frac{-0.3h}{D}} \quad (2)$$

Con D como el diámetro de nuestro reactor, d_{bm} como el diámetro de la burbuja si ocurrieran coalescencias sin restricciones en un reactor del mismo diámetro, calculado de la siguiente manera:

$$d_{bm} = 2.59 * \frac{(U - U_{mf}) * A^{0.4}}{g^{0.5}} \quad (3)$$

Donde A es el área transversal del reactor. Como ultimo parámetro de la ecuación (2) tenemos d_{b0} como el diámetro estimado a la salida de la tobera:

$$d_{b0} = 1.38 * \frac{(U - U_{mf}) * A^{0.4}}{g^{0.5} * N_{or}} \quad (4)$$

Con N_{or} como el número de entradas de aire. Una vez calculado el diámetro de las burbujas hay varias propiedades que se pueden calcular a partir de ello tales como la velocidad de ascenso de las burbujas, calculada de la siguiente manera:

$$u_b(h) = 0.711\sqrt{g * d_b(h)} + (U - U_{mf}) \quad (5)$$

Para un régimen de slugging la velocidad superficial mínima que se debe alcanzar esta determinada teóricamente por la siguiente ecuación:

$$U_{ms} = U_{mf} + 0.07\sqrt{g * D} \quad (6)$$

También es posible estimarla experimentalmente aumentando la velocidad del agente fluidizador hasta lograr divisar una sola burbuja. Este régimen ocurre cuando las burbujas coalescen de una manera tal que a la superficie llega una sola burbuja. Se han encontrado dos tipos de slug: la primera es llamada como slug de nariz redonda donde las burbujas tienen forma de bala y son axialmente simétricas, estas si existe mucha turbulencia se pegan a las paredes del reactor. Se ha estimado que estas burbujas suelen tener un diámetro estimado tal que:

$$d_e \geq 0.5 * D \quad (7)$$

El segundo tipo de slug es conocido como slug de nariz cuadrada, este ocurre cuando el reactor tiene un diámetro muy pequeño, cuenta con columnas muy suaves, una alta velocidad superficial del gas y un particulado del tipo B o D. Este tipo de slugs tiende a utilizar todo el diámetro del reactor. Los diferentes tipos de slugs quedan ilustrados de mejor manera en la siguiente figura:

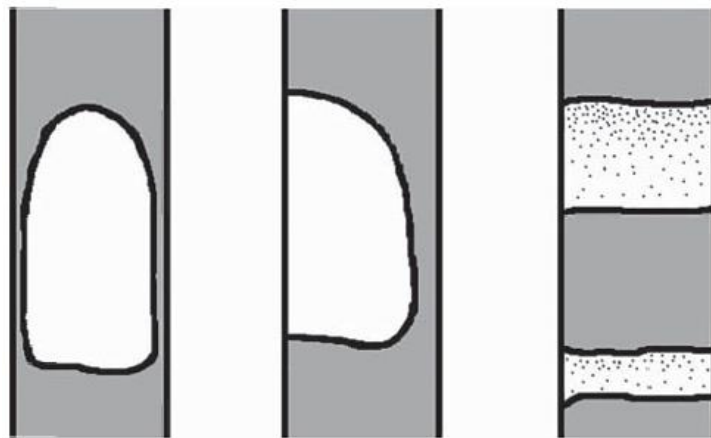


Figura 3.3 Diferentes tipos de slugs [1]

Las estimaciones para el régimen de slugs están en función del diámetro del reactor y no de la burbuja como tal, podemos estimar la velocidad de ascenso inicial de una burbuja dependiendo del tipo de slug presente. En el caso de un slug de nariz redonda tenemos:

$$u_{s0} = 0.35 * \sqrt{g * D} \quad (8)$$

En el caso de que esta se pegue a la pared del reactor el coeficiente 0.35 de la ecuación (8) se cambia por 0.49. Y en el caso de tener un slug de nariz cuadrada el coeficiente se cambia a 0.18. Cuando el slug se vuelve constante la velocidad de ascenso pasa a estimarse de la siguiente manera [1]:

$$u_s = u_{s0} + k * (U - U_{mf}) \quad (9)$$

Para reactores de tipo gas-sólido k suele tener un valor de 1. En el caso de obtener un slug axialmente simétrico es posible estimar el largo de la burbuja y con ella la frecuencia en la cual estas van reventando en la superficie, no así cuando son asimétricas.

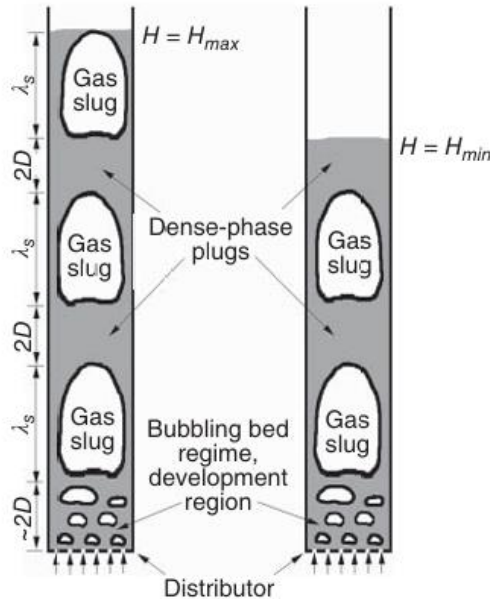


Figura 3.4 Secuencia de ascenso y separación entre slugs [1]

De esta forma es posible determinar el largo de la burbuja con la siguiente ecuación cuadrática [1]:

$$\frac{\lambda_s}{D} - 0.495(1 + \beta) \sqrt{\frac{\lambda_s}{D}} + 0.061 - 1.94 * \beta = 0 \quad (10)$$

Con $\beta = \frac{U - U_{mf}}{u_{so}}$ (11) y λ_s como el largo de la burbuja. Es por ello que lograr un slug axialmente simétrico es de suma importancia, ya que al poder estimar su largo y diámetro podemos obtener su volumen. Además, es posible estimar la frecuencia entre slugs, dada por:

$$f_s = \frac{u_s}{\lambda_s + 2D} \quad (12)$$

En ambos regímenes el particulado presente en el reactor se expande. Esto ocurre ya que las burbujas al recorrer todo el particulado hasta llegar a la superficie, no solo usan espacio del reactor, sino que al mismo tiempo arrastran partículas con ellas por lo que la altura varia. Tener en consideración esta variación en la altura es de suma importancia ya que en la ecuación $x = 2 * d * \tan\left(\frac{HFOV}{2}\right)$ (16), para calcular el tamaño del plano y posteriormente estimar el tamaño de un objeto presente en dicho plano, depende de la distancia entre el objeto y la cámara. Por lo que hay que estimar cuanto va a variar la altura entre regímenes. En el caso de un régimen slugging la altura máxima, que muestra la Figura 3.4, puede ser estimada tal que:

$$H_{max} = \left(\frac{U - U_{mf}}{u_s} + 1 \right) * H_{mf} \quad (13)$$

En el caso de un régimen burbujeante la estimación sigue el siguiente paso a paso [1] [3]:

- 1- Calcular $d_b(0.4H_{mf})$, $d_b(0)$ y $d_b(H_{mf})$.
- 2- Calcular $u_b(0.4H_{mf})$, $u_b(0)$ y $u_b(H_{mf})$. Generar un promedio $\overline{u_b}$.
- 3- Calcular $Y = 1.64 * Ar^{0.2635}$. Con Ar como el número de Arquímedes.
- 4- Desarrollar la relación $H = H_{mf} * \frac{\overline{u_b}}{\overline{u_b} - Y(U - U_{mf})}$ (14).
- 5- Ahora con H calculado volvemos a calcular $d_b(H)$ y $u_b(H)$ con esto volvemos al paso 4 para obtener una segunda iteración de la estimación.

3.2. Field of view y cálculo de área

El field of view (FOV) es el ángulo total de una imagen que una cámara puede capturar, cualquier cosa fuera de este ángulo no será capturado. Este dato nos entrega el área máxima que la cámara puede captar, y está en función de la distancia focal del lente instalado y del tamaño del fotodetector. El FOV cuenta con dos componentes, la parte vertical (VFOV) y horizontal (HFOV) como se puede ver en la siguiente imagen [5]:

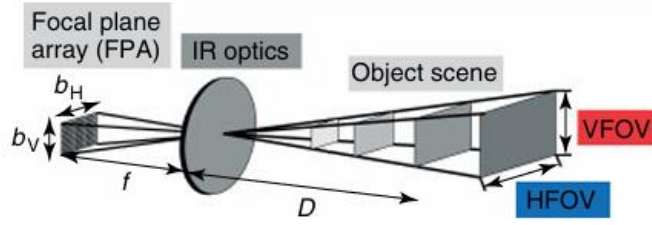


Figura 3.5 Descomposición del FOV [5]

Este se puede calcular de la siguiente manera:

$$FOV = 2 * \arctan\left(\frac{b}{2 * f}\right) \quad (15)$$

Con f como la distancia focal dada por el lente y b como el tamaño del fotodetector, variando este por el tamaño vertical u horizontal es que obtenemos el VFOV o HFOV. Conociendo el campo de visión de nuestra cámara y con simple propiedades trigonométricas de un triángulo rectángulo podemos determinar el tamaño del plano a una distancia cámara-objeto (d) de la siguiente manera [5]:

$$x = 2 * d * \tan\left(\frac{HFOV}{2}\right) \quad (16)$$

$$y = 2 * d * \tan\left(\frac{VFOV}{2}\right) \quad (17)$$

Gracias a esto podemos estimar el tamaño de un objeto presente en la imagen si conocemos cuantos pixeles ocupa el objeto. Puede ser mediante regla de tres tal que:

$$objeto_estimado_{mm} = \frac{objeto_{px}}{sensor_{px}} * x, y_{mm} \quad (18)$$

3.3. Optical Flow por método de Lucas-Kanade.

Para calcular el flujo óptico, se ve la intensidad (I) de un píxel (x, y, t) de la siguiente manera:

$$I(x, y, t) = I(x + dx, y + dy, t + dt) \quad (19)$$

Utilizando la serie de Taylor tenemos lo siguiente:

$$I(x + dx, y + dy, t + dt) = I(x, y, t) + \frac{dI}{dx} * \partial x + \frac{dI}{dy} * \partial y + \frac{dI}{dt} * \partial t \quad (20)$$

Ahora relacionando esas dos ecuaciones obtenemos lo siguiente:

$$I_x * V_x + I_y * V_y = -I_t \quad (21)$$

Este sistema no puede ser resuelto ya que cuenta con dos incógnitas y una sola ecuación. Sin embargo, el método de Lucas-Kanade propone asumir que en una ventana de $n \times n$ pixeles tienen el mismo movimiento, por lo que ahora contamos con las ecuaciones suficientes para resolver este sistema, que toma la siguiente forma [6]:

$$\begin{bmatrix} I_x(x_1, y_1) & I_y(x_1, y_1) \\ \vdots & \vdots \\ I_x(x_n, y_n) & I_y(x_n, y_n) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_t(x_1, y_1) \\ \vdots \\ I_t(x_n, y_n) \end{bmatrix} \quad (22)$$

Este sistema puede escribirse de la siguiente forma matricial: $A * v = b$. Utilizando el método de mínimos cuadrados tenemos que:

$$A^T * A * v = b \quad (23)$$

De aquí obtenemos:

$$v = (A^T * A)^{-1} * A^T * b \quad (24)$$

Calculando así nuestro vector de flujo v .

4. Setup de laboratorio

Para la toma de imágenes se utilizó una cámara de la marca Thorlabs, específicamente el modelo DCC1645C. Las especificaciones técnicas de la cámara se presentan en la siguiente tabla [7]:

Tabla 4.1 Especificaciones técnicas de DCC15645C

Tipo de sensor	RGB
Numero de pixeles (HxV)	1280 x 1024
Tamaño del sensor (HxV)	4.61mm x 3.69mm
FPS máximo	25 FPS
Píxel clock speed (MHz)	5-40
Montaje de lente	CS-Mount

Además de considerar tanto las dimensiones físicas de la cámara, para el montaje en la planta, como la eficiencia cuántica y responsividad del fotodetector:

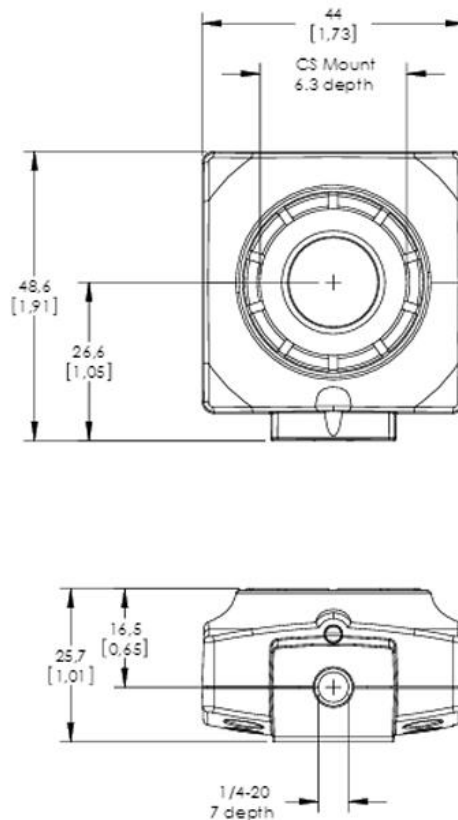


Figura 4.1 Dimensiones de DCC15645C [7]

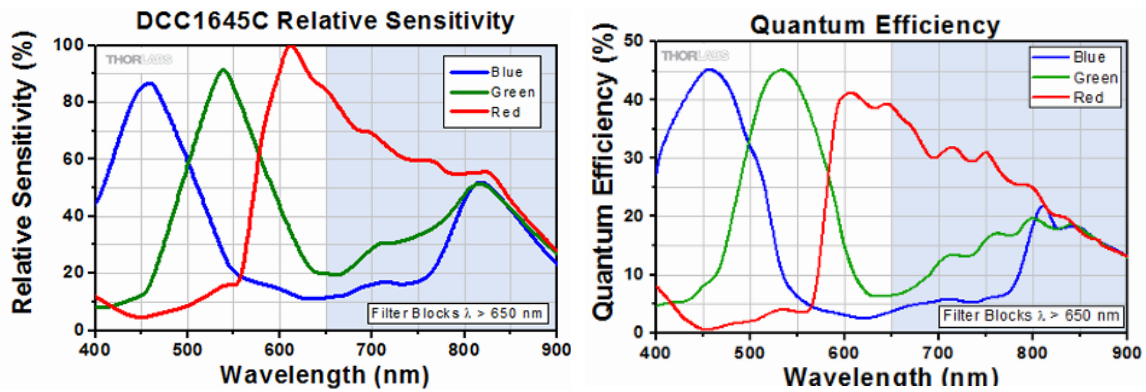


Figura 4.2 Sensibilidad relativa y Eficiencia cuántica [7]

Al momento de elegir lente, contamos con lentes de 35 [mm], 50 [mm] y 100 [mm]. Sabemos que el diámetro de la mirilla instalada es de 50.8 [mm] y el diámetro de la cámara principal del reactor es de 108 [mm]. Calculamos los distintos FOV de la cámara con los distintos lentes disponibles. La idea es calcular el tamaño de los planos variando la distancia entre la cámara y la mirilla, con ello buscamos lograr capturar solo la apertura que nos entrega la mirilla sin capturar otros objetos presentes en la tapa del reactor. Los resultados se presentan en las siguientes tablas y fueron entregados por el código del Anexo A:

Tabla 4.2 Resultados para lente de 35mm

Distancia cámara-mirilla	500	520	550	580	600
Tamaño del plano vertical	52.71 mm	54.82 mm	57.99 mm	61.15 mm	63.25 mm
Tamaño del plano horizontal	65.86 mm	68.50 mm	72.44 mm	76.40 mm	79.03 mm

Tabla 4.3 Resultados para lente de 50mm

Distancia cámara-mirilla	580	600	650	680	700
Tamaño del plano vertical	42.80 mm	44.28	47.94 mm	50.18 mm	51.60 mm
Tamaño del plano horizontal	53.48 mm	55.3 mm	59.93 mm	62.69 mm	64.54 mm

El lente de 100 [mm] fue descartado, ya que para obtener los resultados deseados sería necesario instalar la cámara a una distancia muy lejana, lo cual resulta inviable debido

a la forma que se montó la placa. Entre los lentes de 35 [mm] y 50 [mm], ambos permitieron capturar por completo el diámetro de la mirilla a una distancia razonable. Sin embargo, se seleccionó el lente de 50 [mm], ya que su instalación a una mayor distancia de la mirilla contribuye a proteger tanto la cámara como el lente de las altas temperaturas presentes en la tapa del reactor. Debido a que, en las pruebas iniciales de enfoque, la mirilla fue sometida a altas temperaturas que terminaron por romperla. Aun así, por precaución en ciertas pruebas se instaló una línea de aire seco para ayudar a mantener la temperatura de la cámara baja.



Figura 4.3 Sistema de refrigeración

Para disminuir los errores de medición se determinó si la mirilla creaba distorsiones a la hora de tomar una foto a través de ella. Para ello se instaló una regla a 1220 [mm] de distancia de la cámara y se tomaron dos fotos, una sin la mirilla y otra con la mirilla entre la regla y la cámara.

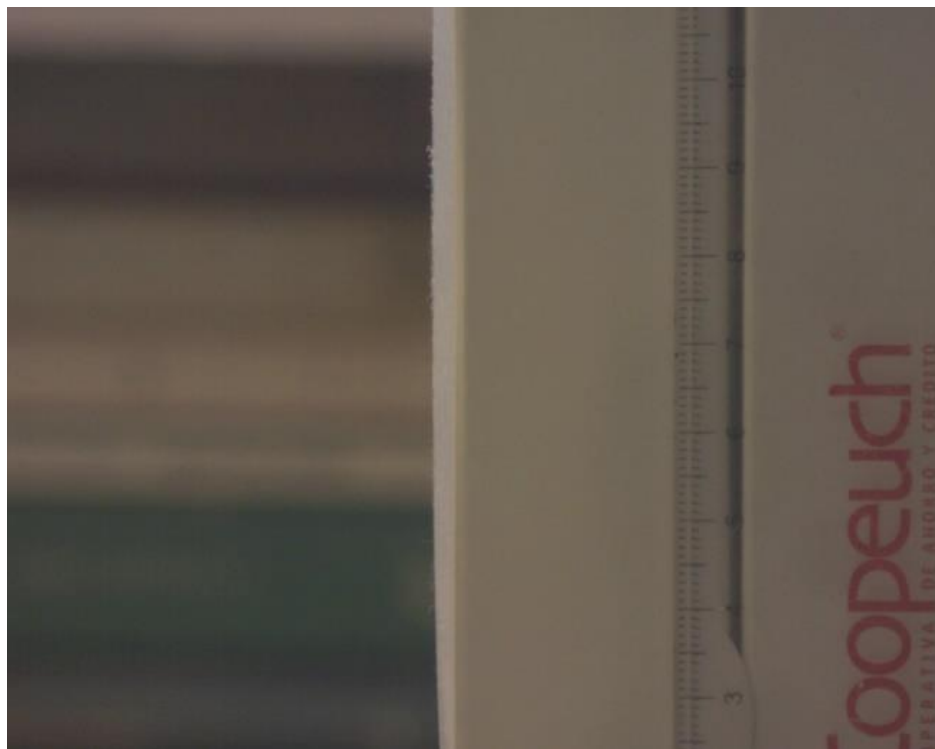


Figura 4.4 Foto de caracterización sin mirilla



Figura 4.5 Foto de caracterización con mirilla

Con estas dos imágenes y con la ayuda de la aplicación de Matlab ImageViewer, se determinó cuantos pixeles corresponden a un largo de 5cm según la regla. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.4 Resultados de la caracterización

	Sin mirilla	Con mirilla
Pixeles correspondientes	605.16px	607.57px
Tamaño real	50 mm	50 mm
Tamaño estimado	53.21mm	53.4mm
Error	+3.21mm	+3.4mm

Si bien existe un error de medición entre el tamaño real y el estimado, podemos ver que el error entre ambas fotos no difiere en una cantidad significativa.

Todo esto fue montado en la parte superior del reactor presente en la planta piloto del DIMET. Este reactor cuenta con dos zonas importantes, la zona de reacción, la cual está dividida en dos debido a las resistencias instaladas para calentar el reactor, y la zona de expansión. La zona de reacción es donde se carga la sílice y se mantiene fluidizado. Esta zona tiene un diámetro de 0.108[m], es un dato importante para los modelos de estimación. La zona de expansión utiliza el principio de Bernoulli para desacelerar posibles partículas en suspensión y gases para posteriormente enviados a la planta de procesamiento de gases. Las dimensiones del reactor son las siguientes:

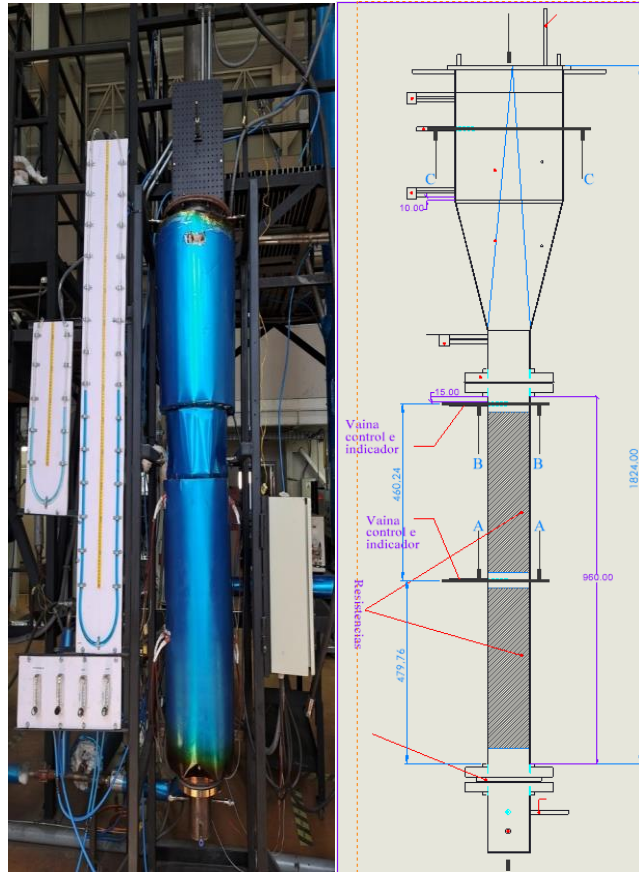


Figura 4.6 Montaje y dimensiones del reactor

En la parte inferior del reactor encontramos el plato de toberas encargado de distribuir el agente fluidizador. Este cuenta con 19 pernos los cuales cada uno tiene 2 entradas de aire:



Figura 4.7 Plato de Tobera n1 con Nor=38

Este reactor cuenta con un sensor de diferencial de presión modelo C9082004 de la marca BTU controls. Este sensor tiene los siguientes datos:

Tabla 4.5 Ficha técnica del sensor de presión

Rango	0-600 mbar
Alimentación	24 VDC
Señal de control	4-20 mA
Tiempo de muestreo	4 seg

Este sensor diferencial tiene su conector Low instalado en la parte inferior del reactor donde se encuentra el plato de toberas y la parte HIGH en la zona de expansión. Esto es un problema, ya que es de interés analizar el diferencial de presión en la zona de reacción para así lograr ver como el lecho se expande. Sin embargo, al considerar la zona de expansión en nuestra medición hará que el diferencial de presión sea distinto, con una variación más suave en comparación al diferencial que se presenta solo en la zona de interés, logrando así que la expansión del lecho sea casi indetectable por medio del diferencial de presión.

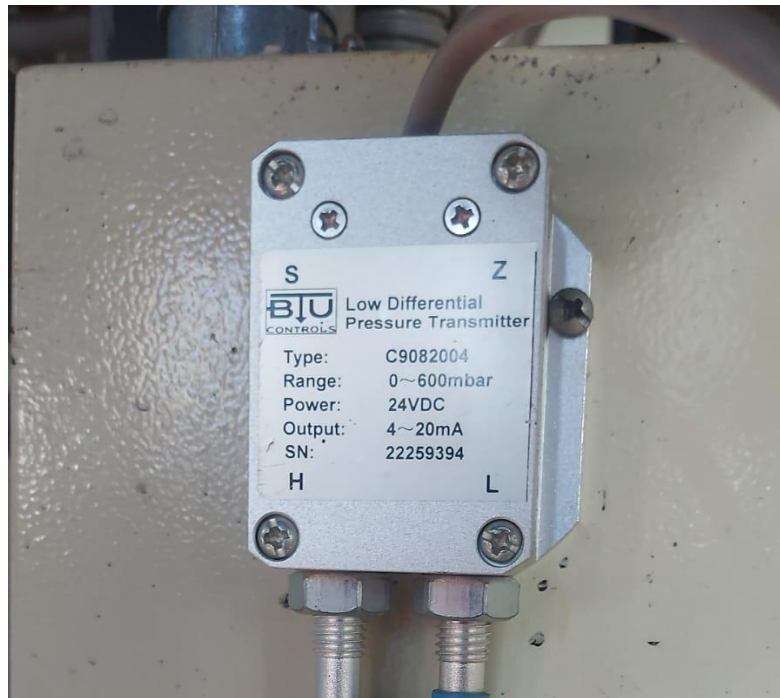


Figura 4.8 Sensor diferencial de presión

5. Pruebas de laboratorio

Se realizaron en total 4 pruebas en el reactor. Todas, a excepción de la primera, siguieron el siguiente procedimiento:

1. Preparar la carga de sílice y calcular sus propiedades físicas como la densidad, volumen, masa, etc. Además de considerar también las del agente fluidizador.
2. Precalentar el reactor hasta alcanzar temperaturas entre los 850°C.
3. Iniciar almacenamiento de los datos de los diferentes sensores.
4. Fijar la velocidad de entrada de nuestro agente fluidizador a 0 m/s y capturar imágenes.
5. Capturar imágenes mientras se aumenta la velocidad hasta lograr ver las primeras burbujas (U_{mf}).
6. Luego se capturan imágenes a esa velocidad sin variar.
7. Posteriormente se capturan imágenes aumentando la velocidad desde U_{mf} hasta observar como el lecho pasa de un régimen burbujeante a un régimen de slugging con el objetivo de calcular la velocidad mínima de slug (U_{ms}).
8. Capturamos imágenes a esa velocidad (U_{ms}) sin variarla.
9. Finalmente variamos la velocidad desde U_{ms} hasta observar como el reactor alcanza un régimen turbulento donde es imposible lograr divisar una burbuja y capturamos imágenes.

Para el procesamiento de imágenes y la identificación de burbujas se siguió el siguiente procedimiento:

1. Calcular el histograma y determinar que componente utilizar.
2. Tomar packs de 25 frames, visualizarlos en la componente seleccionada en el paso anterior y buscar la presencia de burbujas.
3. Determinar en que frame se ve por primera vez la burbuja y en cual desaparece. Con esto podemos determinar la frecuencia de ruptura.
4. Medir el diámetro de la burbuja (en px) en el frame donde alcanza su tamaño máximo (ImageViewer).
5. Ingresar el diámetro en px en un algoritmo para calcularlo en metros.

5.1. Prueba 1: 20/01/2025

Esta prueba se realizó con dos objetivos principales, lograr un buen enfoque con la cámara y determinar a qué temperatura es posible visualizar algo dentro del reactor. En esta prueba se logró determinar que para temperaturas inferiores a los 800°C es imposible distinguir algo dentro del reactor ya que la carga no es lo suficientemente incandescente, por lo que las siguientes pruebas se realizaran a temperaturas sobre ese umbral. Además, se corroboró los cálculos hechos para la elección del lente y la distancia a la cual se debe instalar la cámara de la mirilla. En este caso se instaló a unos 53 [cm] donde se logra capturar por completo la zona de reacción.

5.2. Prueba 2: 23/01/2025

Para esta prueba se cargó sílice seca con las siguientes propiedades:

Tabla 5.1 Datos de la carga P2

Densidad del solido	1350 kg/m ³
Masa del solido	8 kg
Volumen del solido	0.0059 m ³
Diámetro ponderado de la partícula (d80)	383e-6 m
Densidad del gas (a 850°C)	0.314 kg/m ³
Viscosidad del gas	4.45e-5 kg/m*s
Numero de Arquímedes	117.8
Altura mínima (Hmf)	0.644 m

Esta carga entra en el grupo B según la clasificación de Geldart. Hay que destacar que para este grupo de partículas la velocidad mínima de fluidización es igual a la velocidad mínima de burbujeo. Por lo que al momento de entrar en el régimen de mínima fluidización también estaremos entrando al régimen burbujeante. Así, para estimar estas velocidades experimentalmente se aumentó el caudal de entrada del agente fluidizador hasta lograr ver las primeras burbujas. Además de esto se grafica el diferencial de presión durante todo el periodo en el que se capturaron imágenes. En la siguiente figura tenemos un gráfico completo del diferencial de presión.

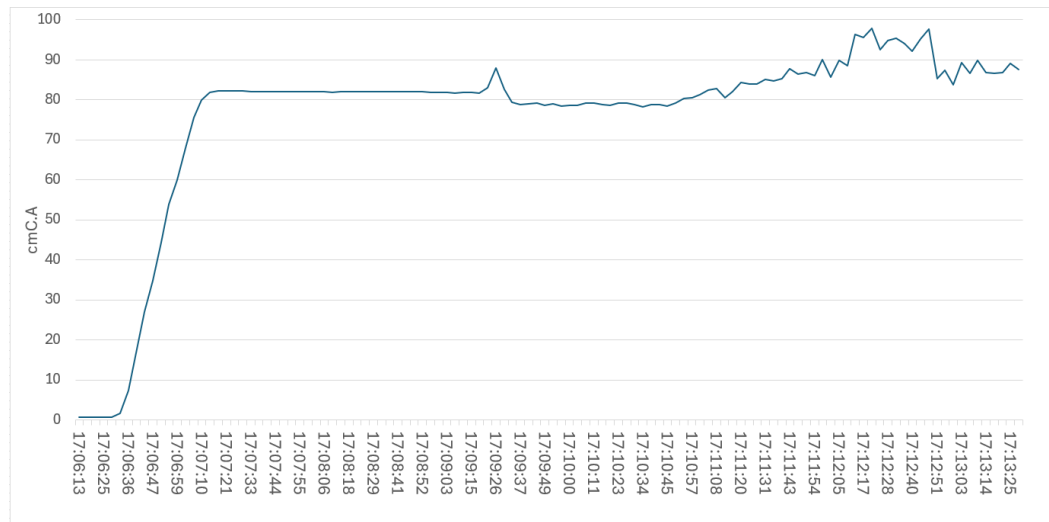


Figura 5.1 Diferencial de presión general

Al inicio de este grafico podemos ver como el diferencial de presión se mantiene en 0 durante el tiempo en el que el lecho esta estático y a una velocidad de 0 [m/s]. Esto en la cámara se ve de la siguiente manera:

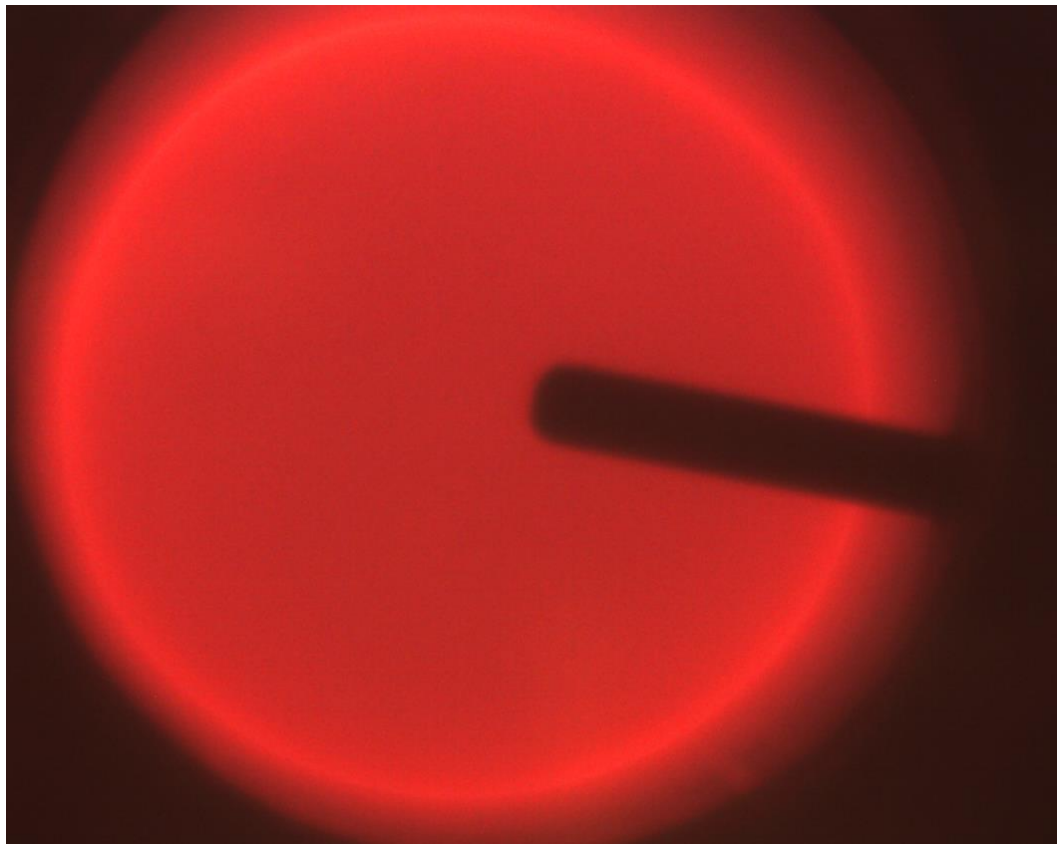


Figura 5.2 Frame de un lecho estático

Son 167 frames iguales, sin ningún cambio ni burbuja visible. Luego aumentamos el caudal de entrada y podemos ver en la figura (5.3) como el diferencial comienza a aumentar, los tiempos de esta grafica corresponden al tiempo de duración del video. Esta gráfica corresponde al momento en el que aumentamos el caudal hasta divisar las primeras burbujas.

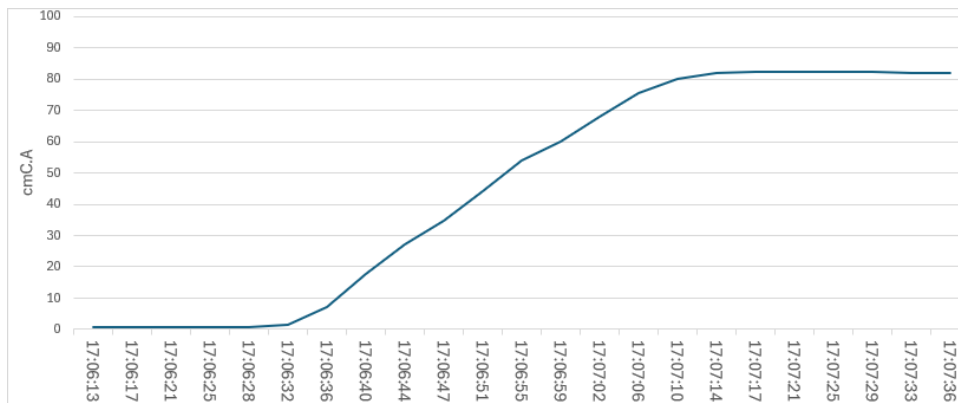


Figura 5.3 Diferencial de presión mientras su aumenta el caudal

La figura siguiente corresponde al instante en el que se divisan las primeras burbujas

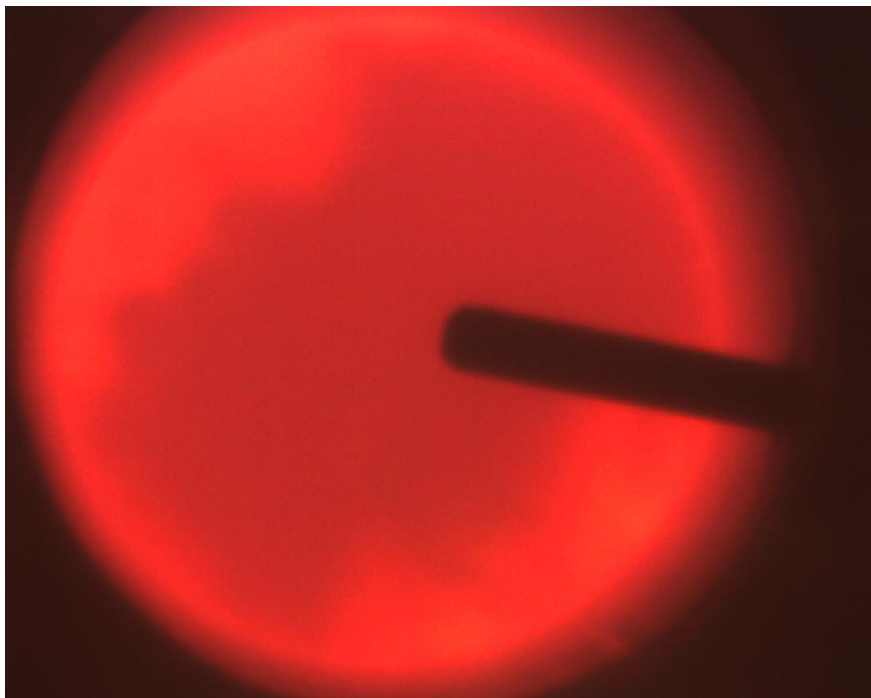


Figura 5.4 Primer frame con burbujas

Esto corresponde a un caudal de 8 [Lpm] o bien 0.055 [m/s]. Los resultados teóricos y experimentales se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 5.2 Comparación de resultados de mínima fluidización

	Experimental		Teórico	
	Lpm	m/s	Lpm	m/s
Umf	8	0.055	4	0.026

Podemos ver una diferencia del doble entre un resultado y otro. Para corroborar, tomamos el cálculo teórico como la velocidad mínima de fluidización y estimamos la expansión del lecho para la velocidad calculada experimentalmente. Este cálculo nos dice que a 0.055 [m/s] el lecho debería estar a una altura de 1.04[m] desde el plato de toberas, sin embargo, esto es imposible ya que las fotos correspondientes a la velocidad experimental (figura 4.4) es posible ver la termocupla correspondiente a la segunda zona de reacción ubicada a 0.96 [m] del plato. Por lo que se determina que el método teórico no es representativo de lo que estamos observando dentro del reactor por lo que utilizamos la velocidad estimada experimentalmente. Esto se debe a que la mayoría de estos modelos matemáticos son realizados para reactores en condiciones ideales, el cual no es nuestro caso. Para las siguientes pruebas no se vuelve a calcular teóricamente las velocidades y se utilizan datos experimentales. Por lo que se utiliza $U_{mf} = U_{mb} = 0.055$ [m/s].

El siguiente set de frames corresponden al lecho a esta velocidad sin variar. Calculamos la expansión de la cama, el diámetro de la burbuja, velocidad de subida y la frecuencia usando los modelos.

Tabla 5.3 Modelo para $U=0.055$ m/s

Expansión del lecho	0 m
Diámetro de la burbuja	0 m
Velocidad de subida	0 m/s

Esto nos dice que a mínima fluidización no debería haber presencia de burbujas, esto es en casos generales, como mencionamos anteriormente para la carga presente en el reactor la mínima fluidización ocurre al mismo tiempo que el mínimo burbujeo por lo que si debería haber presencia de burbujas, pero pequeñas.

Para lograr medir las burbujas presentes en nuestras fotos, primero calculamos el histograma de este set de imágenes para determinar información sobre los niveles de intensidad y contraste para determinar en qué componente será más fácil visualizar las burbujas.

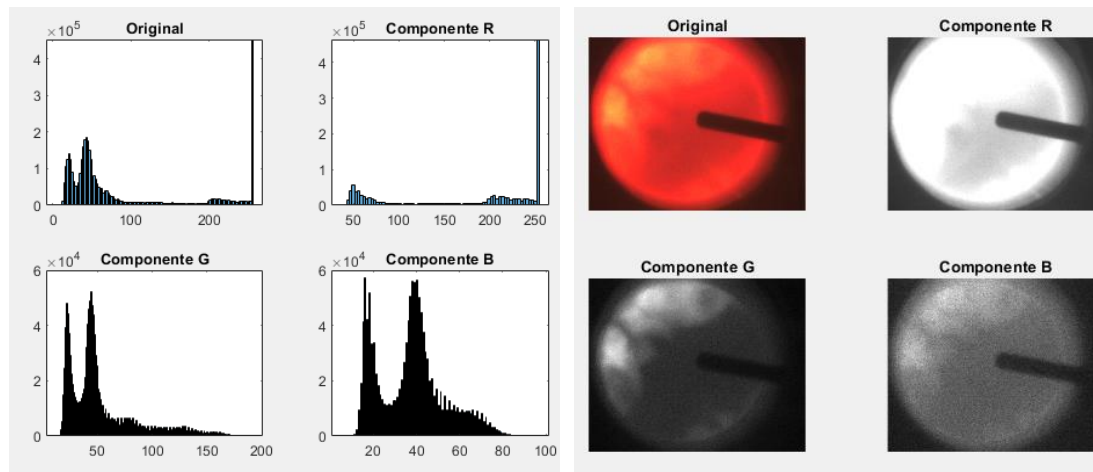


Figura 5.5 Histograma a $U=0.055$ m/s

Se utiliza en este caso las fotos en su componente G. Además, para calcular el tamaño hay que considerar la distancia entre la cámara y el objeto, en este caso las burbujas. Esta distancia corresponde la distancia entre la cámara y la mirilla más la altura del reactor menos la altura a la que se encuentra el lecho, en este caso la distancia cámara objeto es de 1.7 [m]. Para analizar frame a frame se toman paquetes de 25 frames, esto se debe a que la cámara toma 25 frames por segundo por lo que iremos segundo a segundo analizando el video. En los primeros 4 frames no vemos ningún cambio ni visualizamos una posible burbuja:

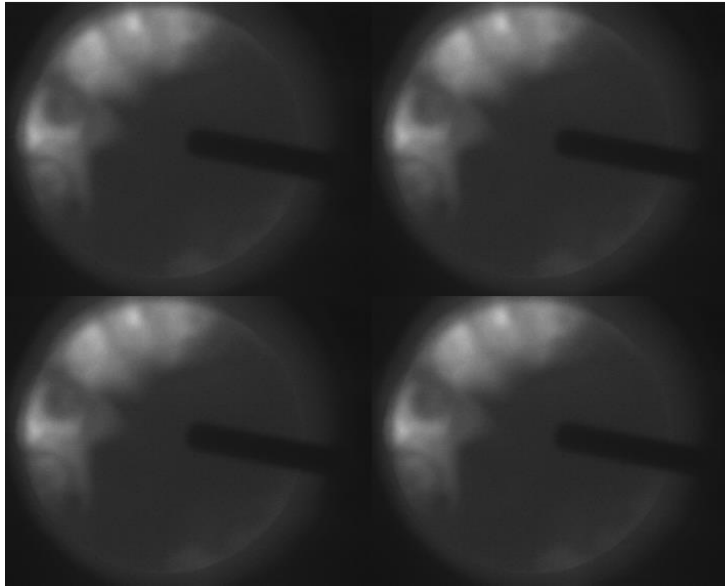


Figura 5.6 Los 4 primeros frames

La primera burbuja es apreciable en el frame 7 donde en la parte superior podemos ver la formación de una burbuja, inmediatamente en los frames 8 a 10 vemos como una segunda burbuja aparece a la izquierda de la primera. Luego desde el frame 10 al 17 vemos como ambas burbujas coalescen para formar una sola burbuja:



Figura 5.7 Aparición de la burbuja en el frame 7



Figura 5.8 Aparición de la segunda burbuja en el frame 8

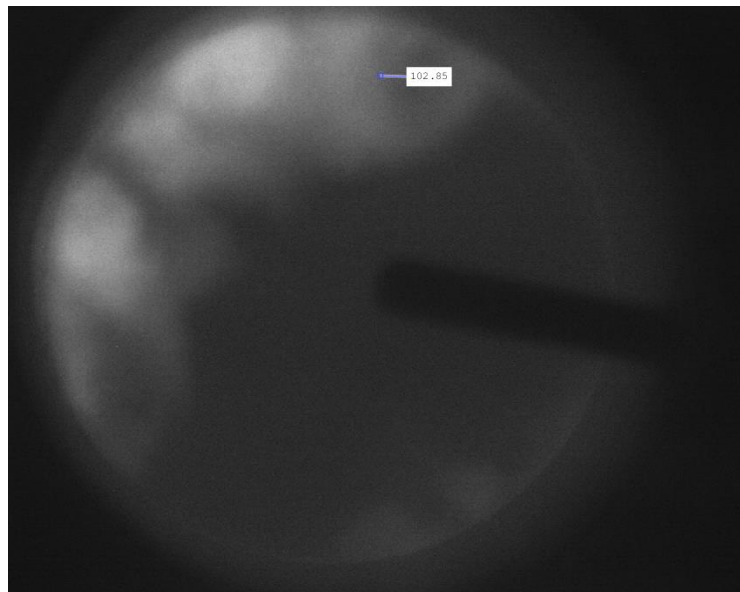


Figura 5.9 Frame 17 con la medida de la burbuja

Esta burbuja es medida gracias a las ecuaciones anteriormente mencionadas en el capítulo 3.2, esta burbuja tiene un diámetro de 0.012 [m]. Para calcular la frecuencia vemos que la burbuja toma unos 12 frames en alcanzar su tamaño máximo antes de reventar, considerando además los 25fps de la cámara, podemos decir que a la burbuja le tomo 0.48 [s] en reventar, esto es $2.08 [s^{-1}]$. La siguiente burbuja de este set de frames aparece en el frame 10 y alcanza su tamaño máximo en el frame 12:

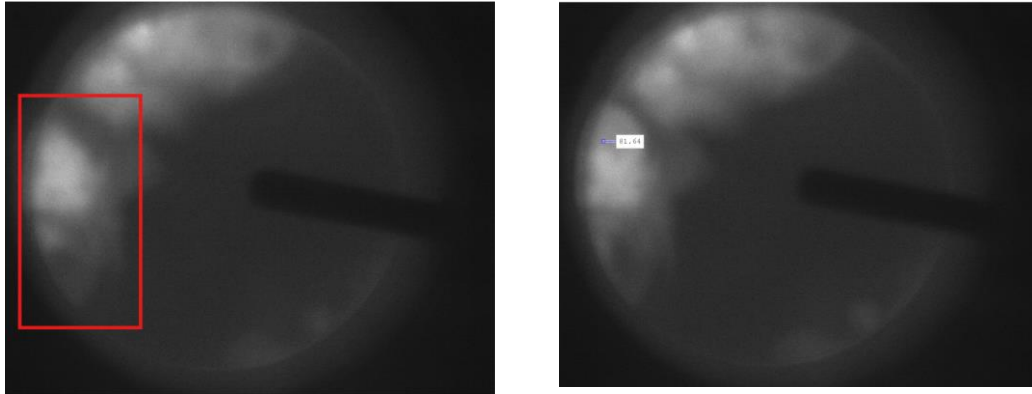


Figura 5.10 Frame 10 y 12

El diámetro estimado de esta burbuja es de 0.01 [m] y una frecuencia de ruptura de unos $6.25[s^{-1}]$. Otra burbuja es visible desde el frame 6 al 15:

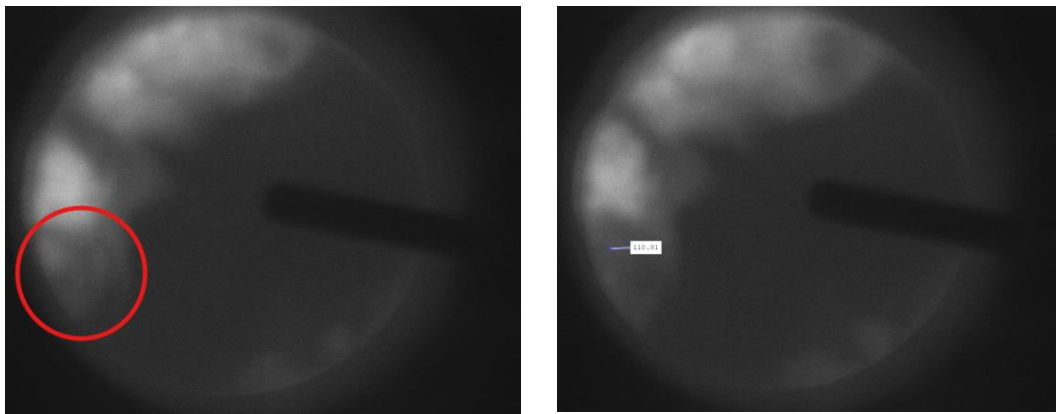


Figura 5.11 Frame 6 y 15

Esta burbuja tiene un diámetro de 0.013 [m] y una frecuencia de $2.5[s^{-1}]$. Finalmente, en este primer set de 25 frames podemos divisar otra burbuja formarse en la parte superior de la imagen, desde el frame 17 al 22:

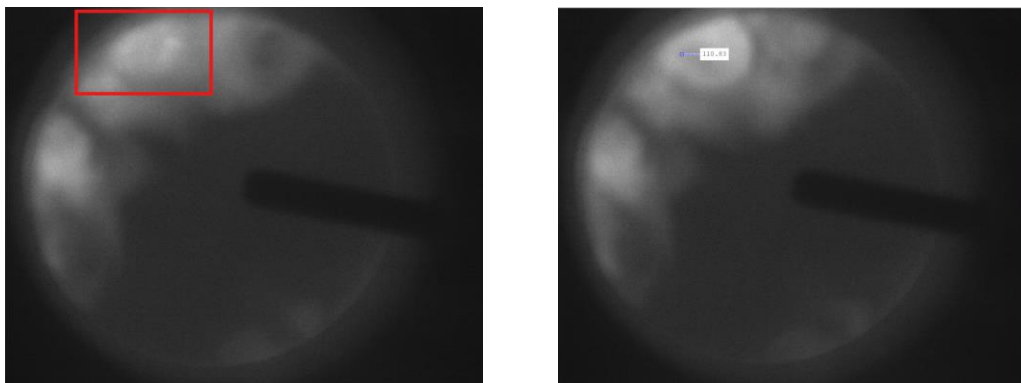


Figura 5.12 Frame 17 y 22

Esta burbuja tiene un diámetro de 0.014 [m] y una frecuencia de $4.1[s^{-1}]$. Estas mediciones corresponden del frame 1 al 25, es decir un segundo de video para el reactor a $U=0.055$ [m/s], durante este periodo se lograron identificar 4 burbujas de un tamaño similar, con un diámetro promedio de 0.012 [m]. Sin embargo, vemos una gran diferencia entre las frecuencias de ruptura de las burbujas. Otro punto importante que destacar es como todas las burbujas visibles en este segundo son formadas apegadas a la pared, no se detecta ninguna burbuja en el centro del reactor. A continuación, tomamos el siguiente set de 25 frames (25 al 50) para analizar el siguiente segundo de la misma manera. La primera burbuja de este frame es visible desde el frame 3 al 12

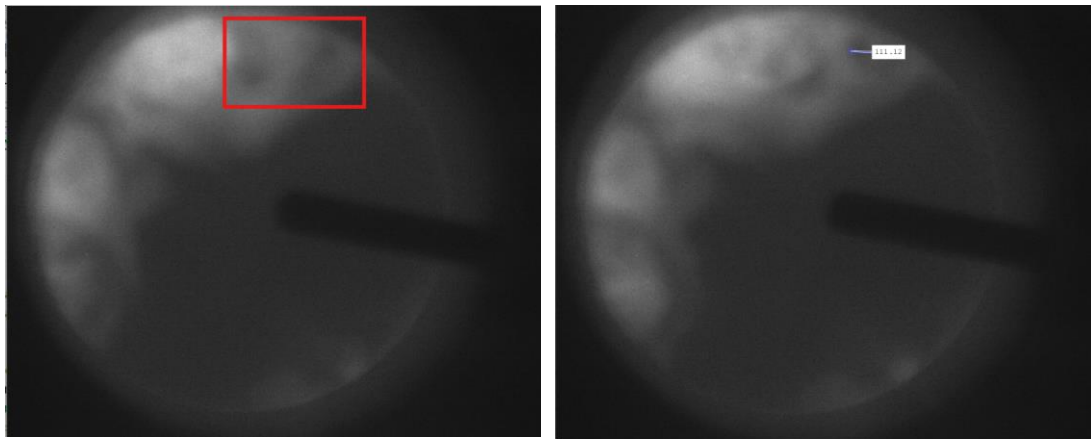


Figura 5.13 Frame 3 y 22

Esta burbuja tiene un diámetro de 0.013 [m] y una frecuencia de $2.5[s^{-1}]$. La siguiente burbuja es visible del frame 8 a 11:

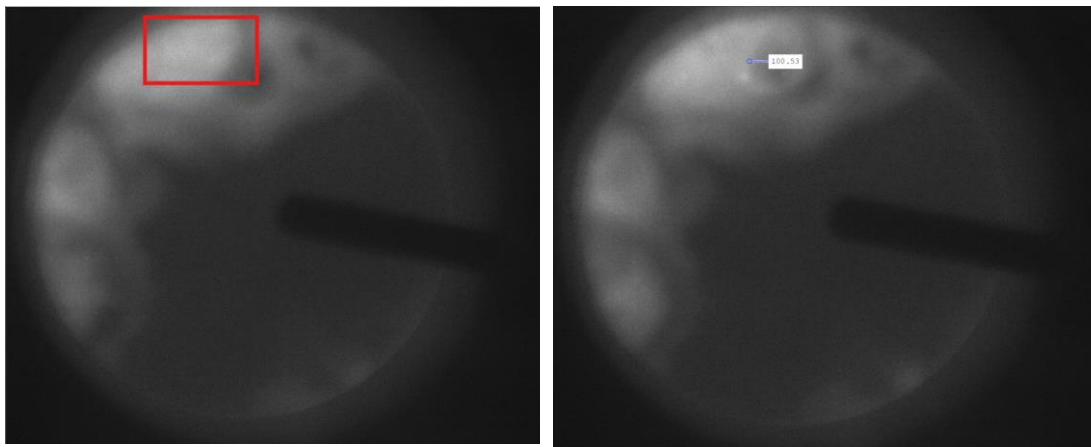


Figura 5.14 Frame 8 y 11

Se estimo que el diámetro de esta burbuja es de 0.013 [m] y frecuencia de 6.25 [s⁻¹].
Otra burbuja es visible desde el frame 14 al 21:

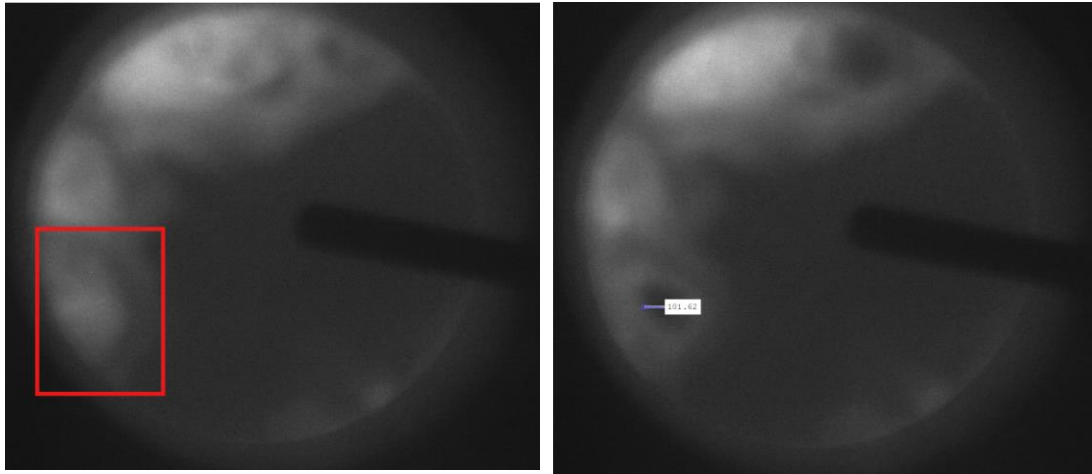


Figura 5.15 Frame 14 y 21

Esta burbuja tiene un diámetro de 0.012 [m] y una frecuencia de 3.12 [s⁻¹].
Inmediatamente en el frame 22 podemos ver como dos pequeñas burbujas aparecen en su lugar:

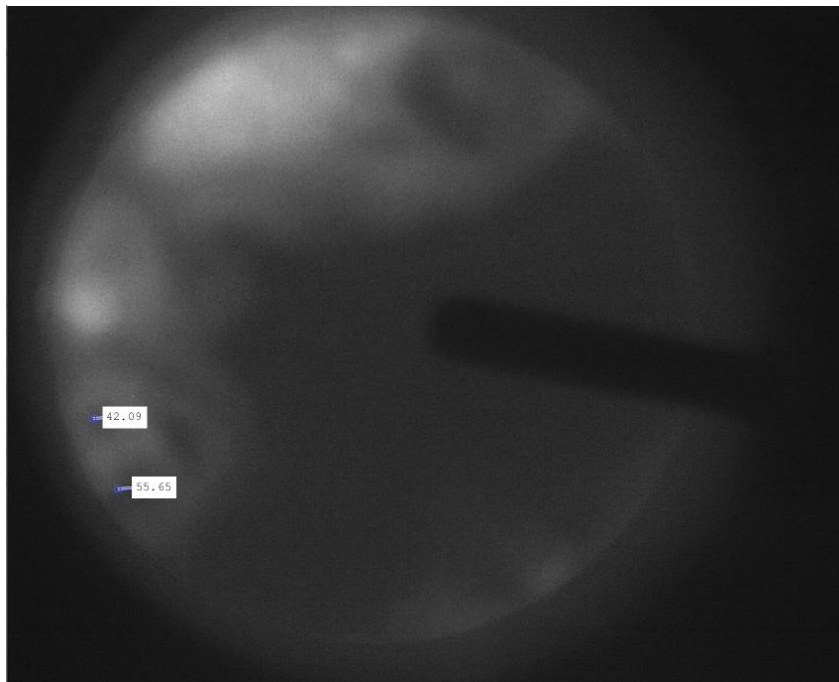


Figura 5.16 Frame 22 con la aparición de dos burbujas pequeñas

Como se mencionó anteriormente, estas burbujas no serán consideradas a la hora de contar las burbujas por segundo debido a lo pequeño de su diámetro. La última burbuja divisible en ese set de frames se puede visualizar desde el frame 18 al 24:

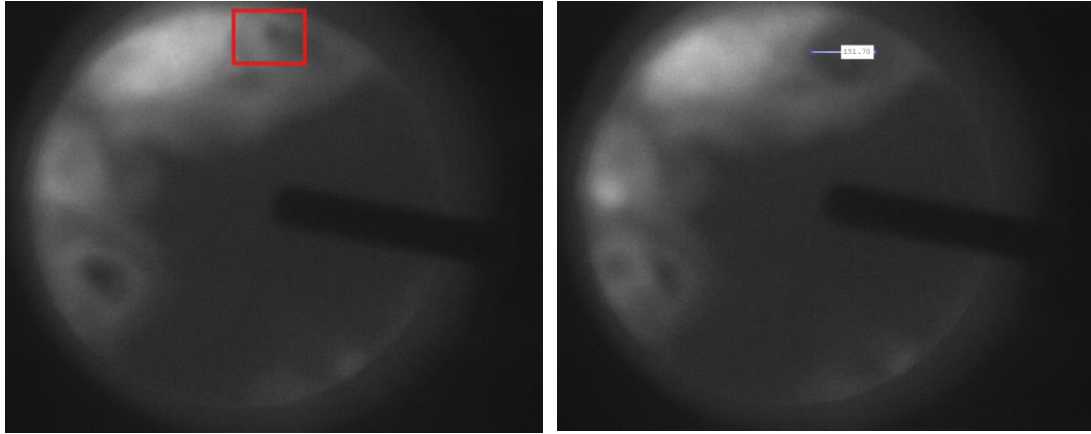


Figura 5.17 Frame 18 y 24

Esta burbuja tiene un diámetro de 0.018 [m] y una frecuencia de $3.6 [s^{-1}]$. En este pack de 25 frames podemos volver a contar 4 burbujas con un diámetro promedio de 0.014 [m], además de volver a observar como la frecuencia de ruptura de las burbujas varían bastante entre ellas. Ahora analizaremos un tercer segundo (50 al 75), donde podemos ver desde el primer frame como las dos pequeñas burbujas que se ve en la figura 5.16 coalescen para formar una sola, esto ocurre desde el frame 22 del set anterior al 6 de este:

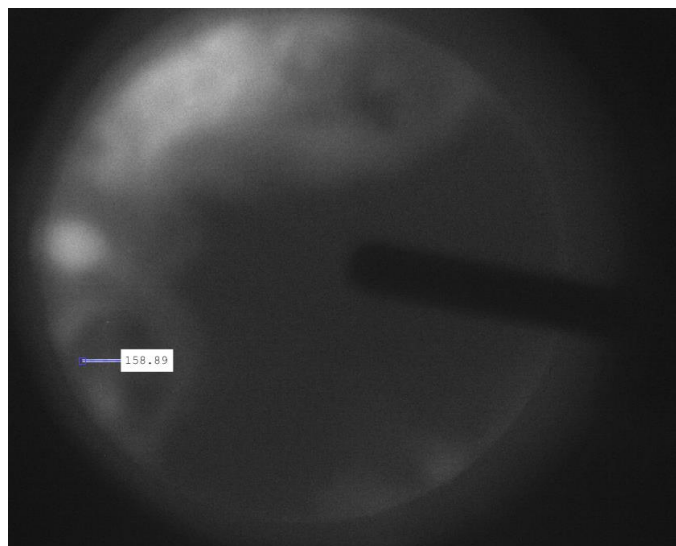


Figura 5.18 Frame 6 donde la burbuja alcanza el tamaño máximo

Esta burbuja tiene un diámetro de 0.019 [m] y una frecuencia de 3.1 [s⁻¹]. Otra burbuja es divisible en el frame 6 hasta 11:

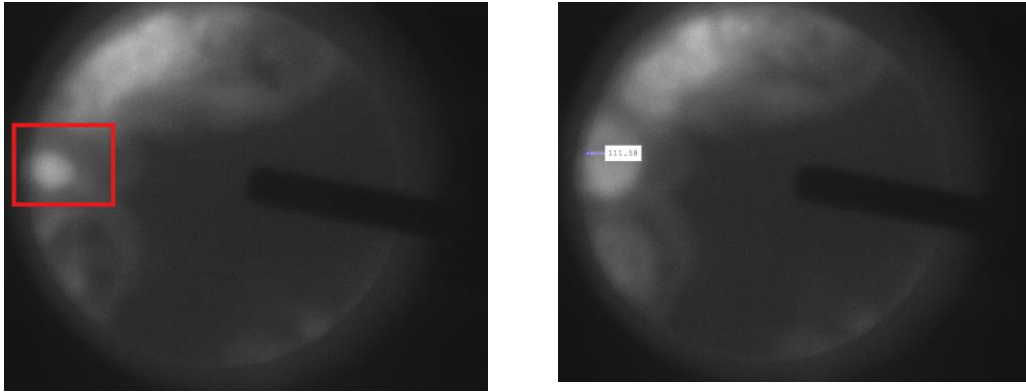


Figura 5.19 Frame 6 a 11

Esta burbuja tiene un diámetro de 0.014 [m] y una frecuencia de 4.1[s⁻¹]. Otra burbuja es encontrada desde el frame 14 al 19:

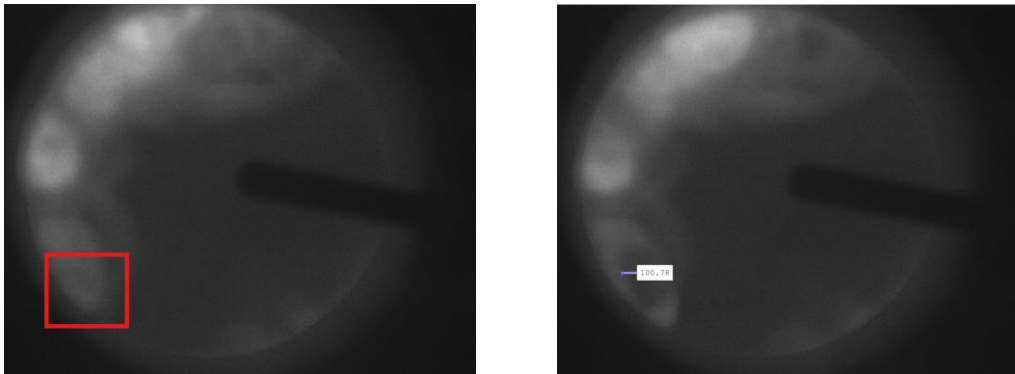


Figura 5.20 Frame 14 y 19

Esta burbuja tiene un diámetro de 0.012 [m] y una frecuencia de 4.1[s⁻¹]. Otra burbuja es divisada desde el frame 17 al 20:

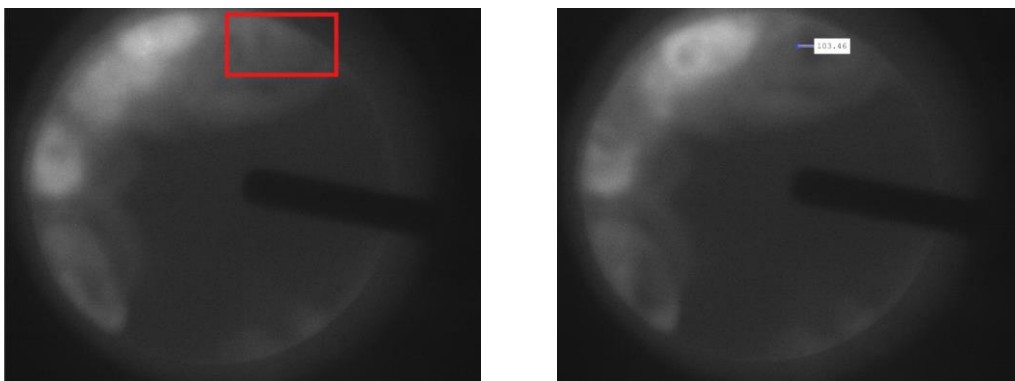


Figura 5.21 Frame 17 y 20

Esta burbuja tiene un diámetro de 0.012 [m] con una frecuencia de 6.25[s⁻¹]. Si bien en el segundo paquete de frames es posible visualizar la aparición de pequeñas burbujas, estas no son consideradas para ese paquete puesto que su diámetro es la mitad de las demás y eventualmente coalescen para formar una burbuja de tamaño superior en el siguiente paquete de frames como podemos ver en las figuras (5.16) y (5.18). Además, este video corresponde al reactor en funcionamiento a la velocidad mínima de fluidización sin ser variada y tampoco se varia la temperatura de operación, por lo que se obtendrá un comportamiento similar en todos los frames siguientes. Con los resultados obtenidos se calcula la media y la desviación estándar con el propósito de ver estadísticamente como varían los parámetros calculados de las burbujas:

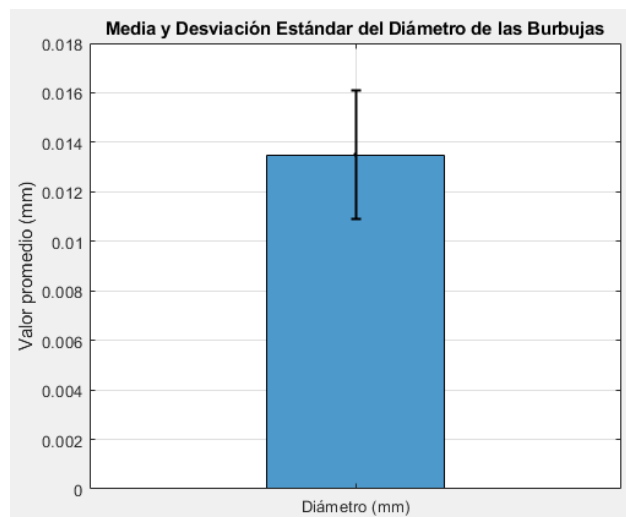


Figura 5.22 Media y desviación estándar del diámetro de las burbujas

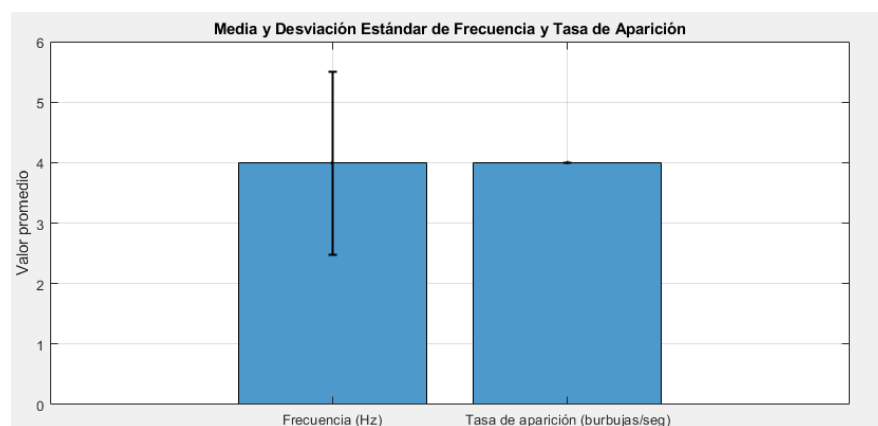


Figura 5.23 Media y desviación estándar de la frecuencia de ruptura y tasa de aparición

De esto podemos concluir que las burbujas tienen un diámetro promedio de 0.013[mm] con una desviación estándar de 0.002 [mm], una frecuencia de ruptura promedio de 3.9 [s⁻¹] con una desviación estándar de 1.5[s⁻¹] y una tasa de aparición bastante estable de 4 [burbujas/seg] con una desviación estándar de 0[burbujas/seg]. En cuanto a la frecuencia, esto se debería poder analizar al observar el grafico del diferencial de presión ya que la expansión de la cama generara variaciones en la presión del reactor:

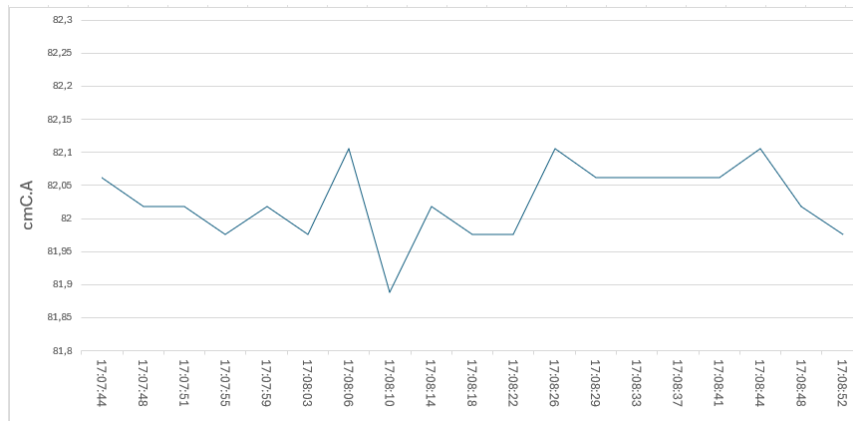


Figura 5.24 Diferencial de presión a U=Umf

Sin embargo, debido a que las tomas de presión del sensor están puestas en el plato de toberas, toma LOW y en la tapa superior del reactor, toma HIGH, es que nuestro sensor mide el diferencial de presión de todo el reactor (figura 4.6), es decir tanto la zona de reacción como la zona de expansión. Mientras que, en la literatura, para lograr tener un análisis frecuencial correcto solo se debe considerar la zona de reacción es por ello que las mediciones de nuestro sensor se consideran como no representativas. Además, cabe mencionar que es posible observar a simple vista como las burbujas tienen una tendencia a aparecer al costado izquierdo del reactor.

De la misma forma en la que se determinó la velocidad mínima de fluidización se determinó la velocidad mínima de slugging. Aumentamos velocidad del agente fluidizador desde los 0.055 [m/s] hasta lograr ver como el reactor pasa de formar varias burbujas pequeñas a una sola burbuja de un tamaño considerablemente mayor. Esta velocidad resulto ser 0.068 [m/s]. A esta velocidad la cama se expande llegando a los 0.66 [m] de altura, esto nos hace lógica ya que a esa altura aun es divisible la termocupla de la zona de reacción 2.

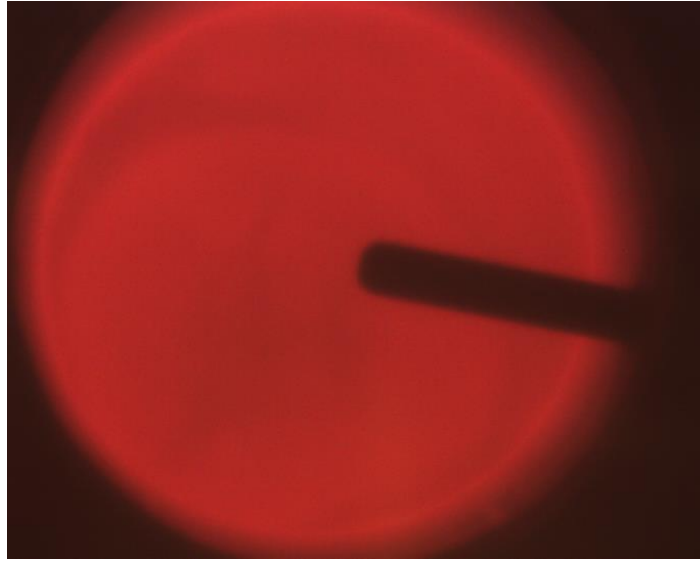


Figura 5.25 Frame donde se aprecia una sola burbuja

Una posible evidencia del aumento del lecho es como la imagen se vuelve más oscura en comparación a las fotos del régimen anterior y si analizamos su histograma podemos ver que la componente roja ya no está saturada, a diferencia del histograma anterior.

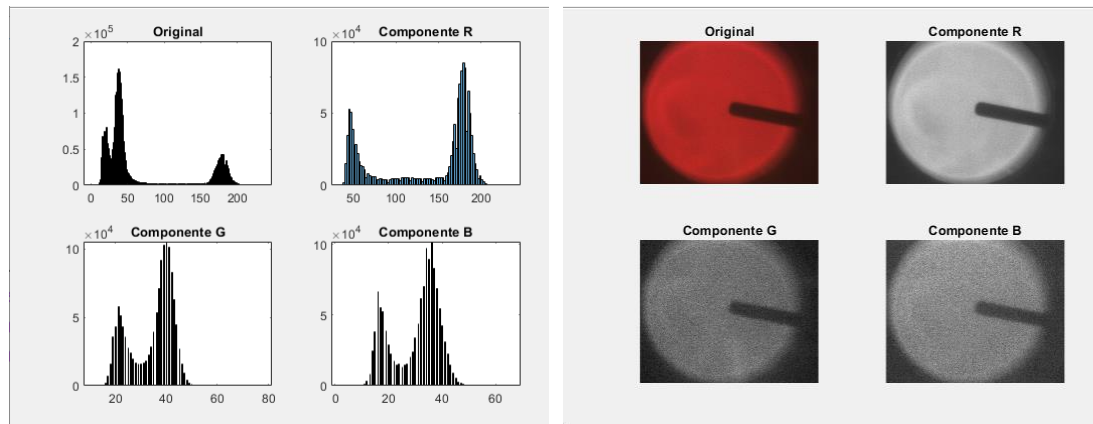


Figura 5.26 Histograma a $U=0.068$ m/s

En este caso se estimó que es más cómodo utilizar la componente R para visualizar las burbujas. Siguiendo con el mismo procedimiento, se toman sets de 25 frames del video del archivo “a 10LPM.tif” y se analizan. Cabe recordar que, para este régimen, las burbujas deben tener un diámetro mayor o igual a la mitad del diámetro del reactor, como lo indica la ecuación 8. Además, que estas no pueden superar el diámetro del reactor de 0.108 [m]. En los primeros frames no se visualiza ninguna burbuja, la primera burbuja es divisible desde el frame 6 a 9:

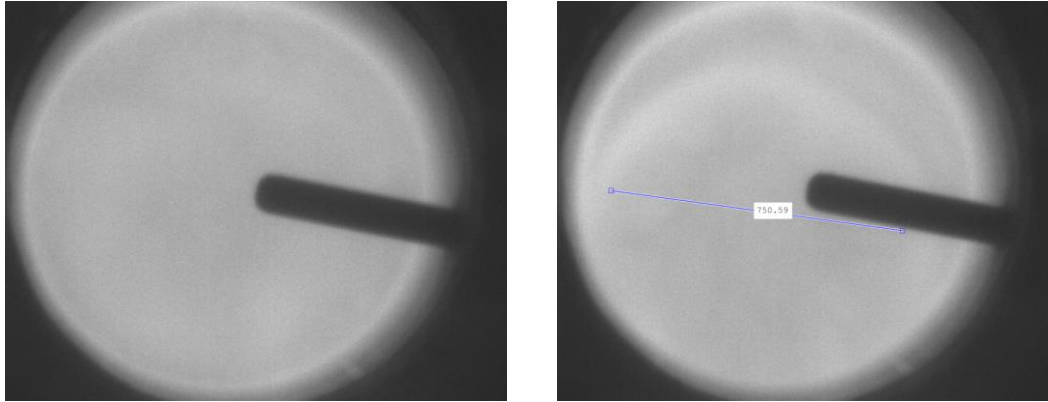


Figura 5.27 Frame 6 y 9

El diámetro es de 0.091 [m] y una frecuencia de ruptura de $6.25 \text{ [s}^{-1}\text{]}$. Podemos recalcar rápidamente como esta burbuja, al igual que las burbujas formadas en el régimen anterior, se encuentra pegada a la pared del reactor y no centrada, por lo que determinamos que nuestra burbuja es de tipo nariz redonda axialmente asimétrica. En los frames siguientes no se logra distinguir ninguna burbuja, por lo que pasamos al segundo set de 25 frames. De los frame 1 a 3 es visible una burbuja:

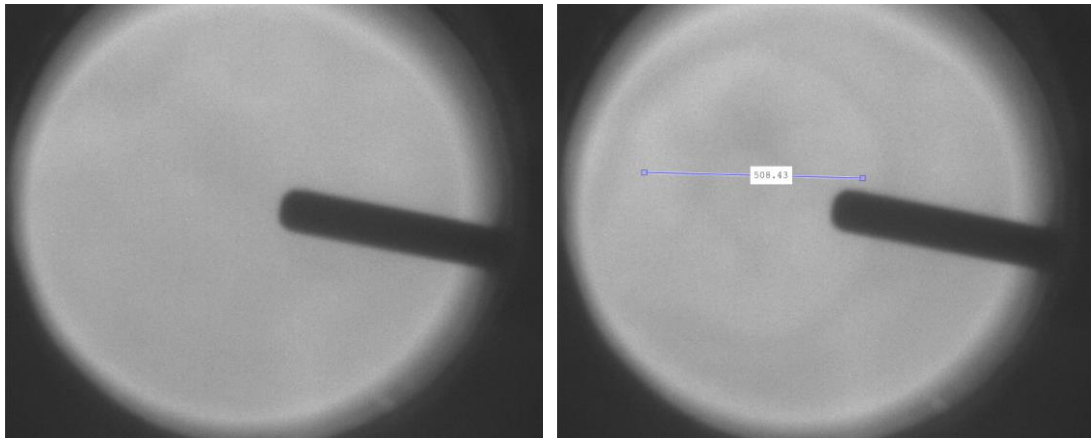


Figura 5.28 Frame 1 y 3

Esta burbuja tiene un diámetro de 0.06 [m] y una frecuencia de $8.33 \text{ [s}^{-1}\text{]}$. Otra burbuja es divisible en el frame 17 hasta 19:

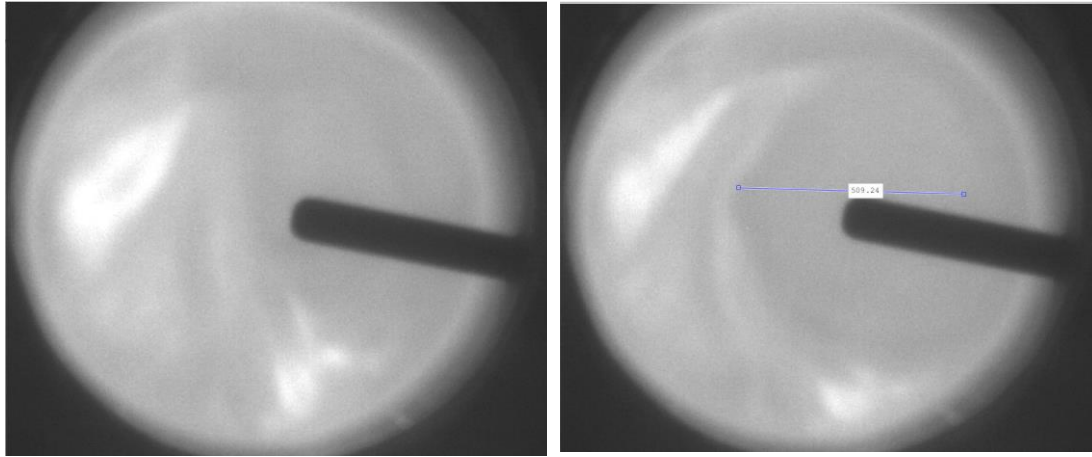


Figura 5.29 Frame 17 y 19

Esta tiene un diámetro de 0.062 [m] y una frecuencia de ruptura igual a $8.33 [s^{-1}]$. Inmediatamente del frame 20 a 21 podemos ver la posible formación de otra burbuja,

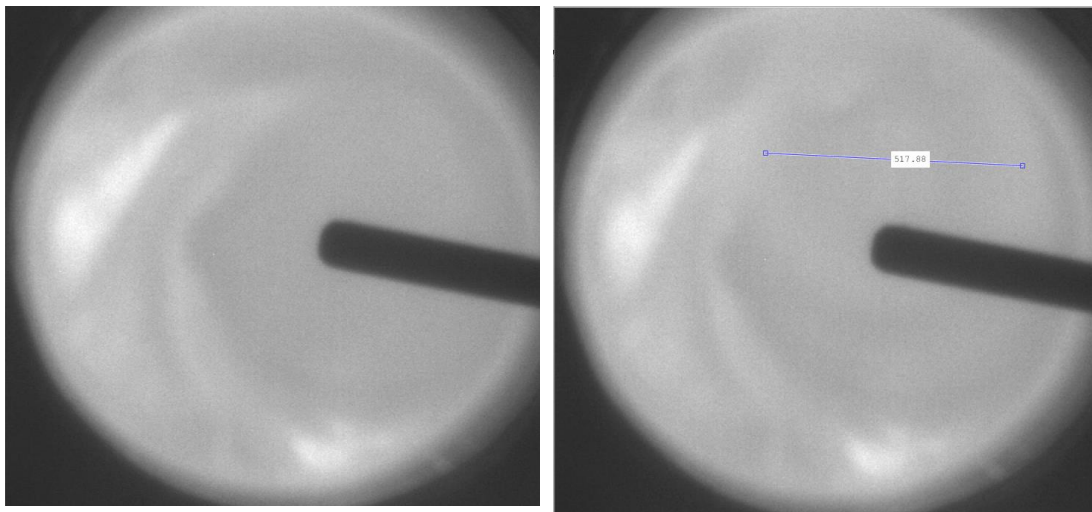


Figura 5.30 Frame 20 y 21

Esta presenta un diámetro de 0.063 [m] y una frecuencia de $12.5[s^{-1}]$. Aquí se contaron 3 burbujas por segundo, con un diámetro promedio de 0.061 [m] y una frecuencia de ruptura promedio de $9.72[s^{-1}]$. Se estudio un segundo set de frames, en los primeros frames no se logra distinguir la aparición de ninguna burbuja, la primera hace aparición en el frame 15:

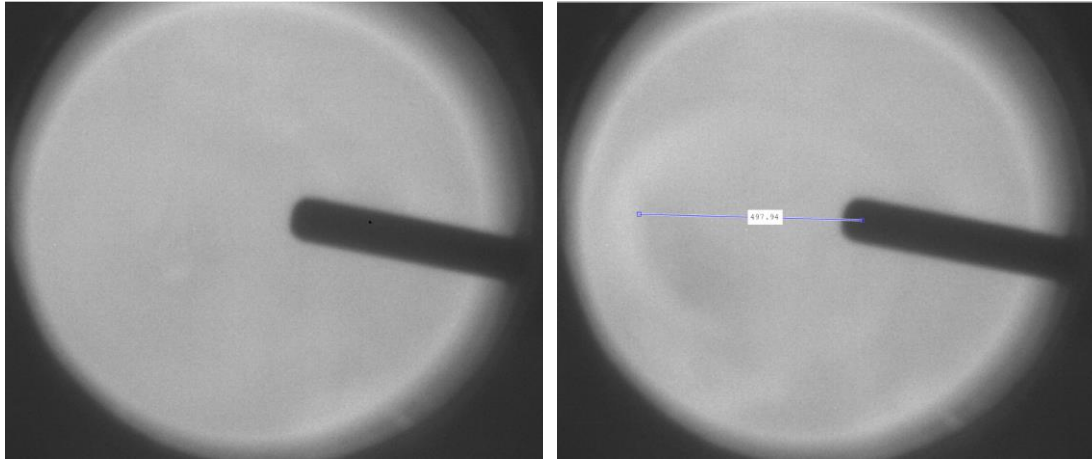


Figura 5.31 Frame 14 y 15

Esta burbuja tiene un diámetro estimado de $0.061[\text{m}]$ y una frecuencia de ruptura de $12.5[\text{s}^{-1}]$. Otra burbuja es divisada en el frame 17:

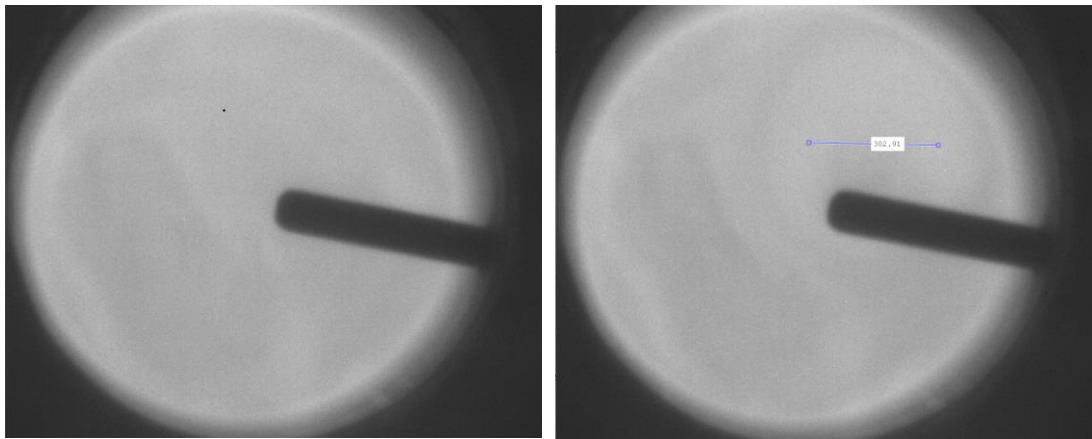


Figura 5.32 Frame 16 y 17

Con un diámetro de $0.037[\text{m}]$ y una frecuencia de $12.5[\text{s}^{-1}]$. Seguida por otra en el frame 25:

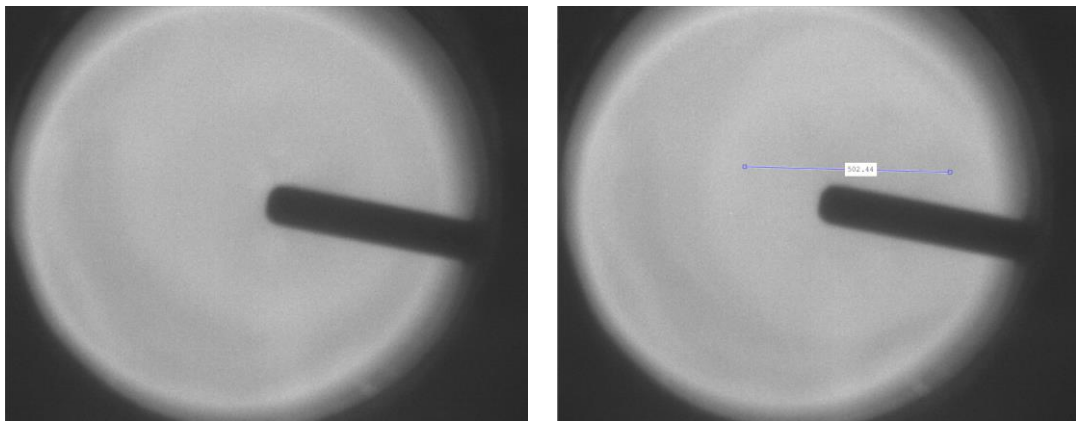


Figura 5.33 Frame 24 y 25

Esta burbuja cuenta con un diámetro promedio de 0.061 [m] y una frecuencia de ruptura de unos $12.5[s^{-1}]$. La primera burbuja del tercer set aparece en el frame 8 alcanzando su tamaño máximo en el frame 10:

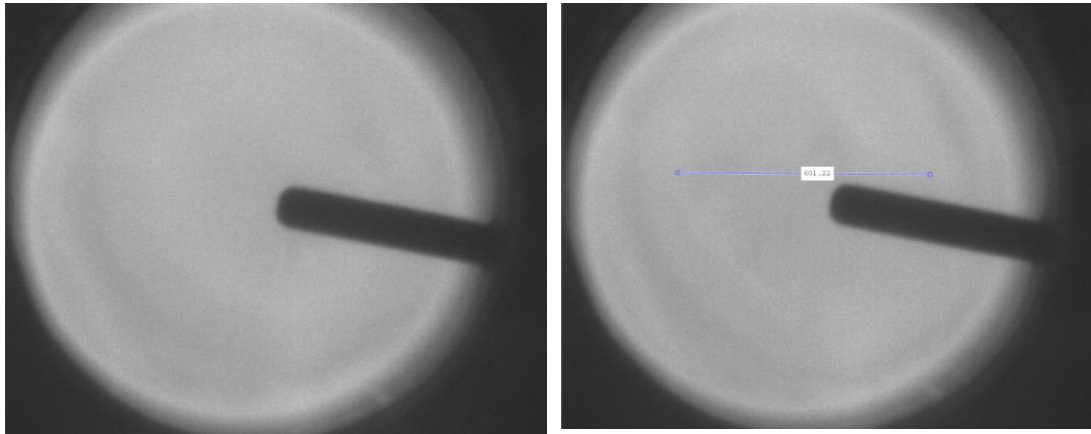


Figura 5.34 Frame 8 y 10

Esta burbuja tiene un diámetro promedio de 0.073[m] y una frecuencia de ruptura de $8.33[s^{-1}]$. La siguiente burbuja se ve desde el frame 17 al 18:

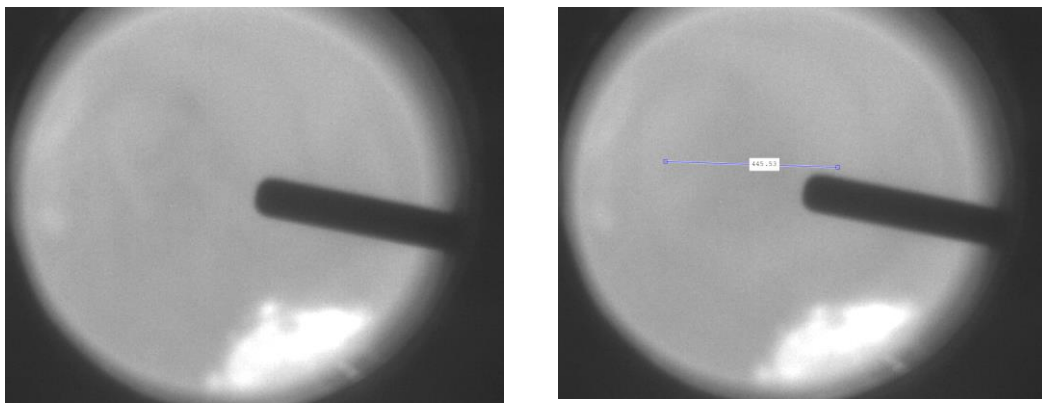


Figura 5.35 Frame 17 y 18

Esta burbuja cuenta con un diámetro de 0.054[m] y una frecuencia de $12.5[s^{-1}]$. En los siguientes frames no se logra ver la aparición de otra burbuja. De la misma manera que para el régimen burbujeante se calcula la media y la desviación estándar de nuestras mediciones:

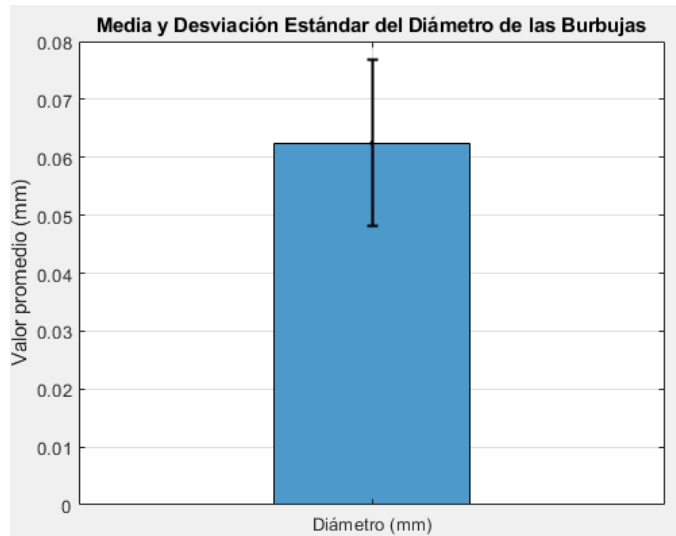


Figura 5.36 Media y desviación estándar de las burbujas en régimen de slugg

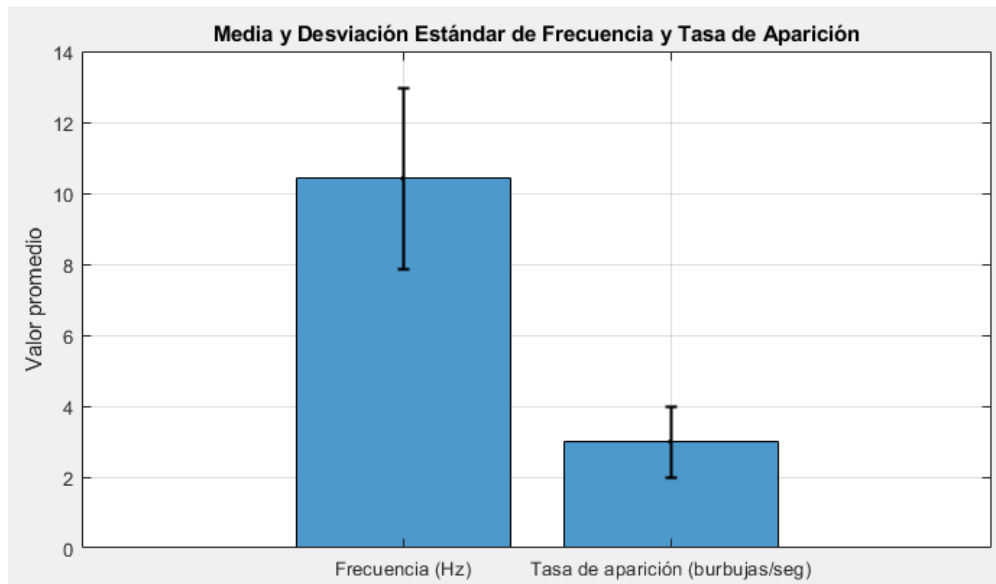


Figura 5.37 Media y desviación estándar de la frecuencia de ruptura y tasa de aparición en régimen de slugg

De esto se estima que las burbujas tienen un diámetro promedio de $0.062[\text{mm}]$ con una desviación estándar de $0.014 [\text{mm}]$, una frecuencia de ruptura promedio de $10.4 [\text{s}^{-1}]$ con una desviación estándar de $2.5[\text{s}^{-1}]$ y una tasa de aparición de $3 [\text{burbujas/seg}]$ con una desviación estándar de $1 [\text{burbuja/seg}]$.

El siguiente video tomado corresponde al régimen turbulento, en este video podemos ver como los primeros frames aun corresponden a un régimen de slugg ya que aún es posible divisar una sola burbuja:

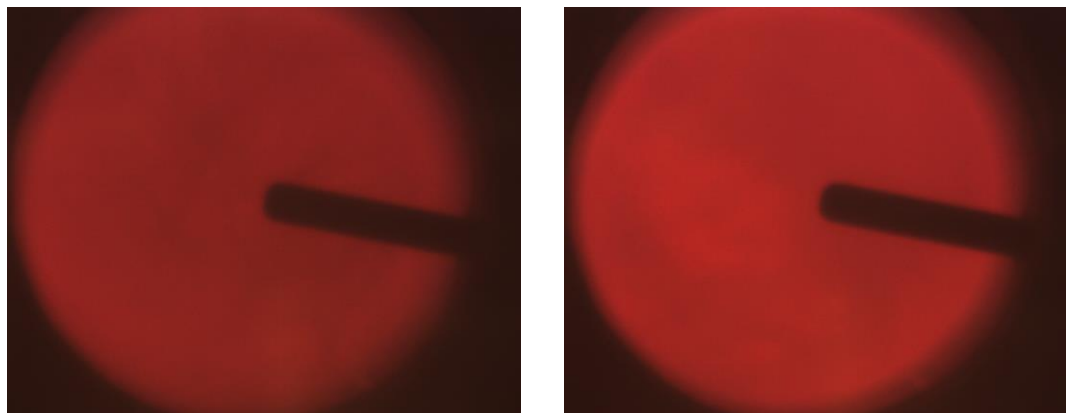


Figura 5.38 Frames donde aún es visible

Sin embargo, inmediatamente al aumentar la velocidad del gas el reactor entra en el régimen turbulento en el cual es imposible de identificar una burbuja y todo se vuelve un caos con las partículas en suspensión, llegando incluso cubrir la termocupla de la zona 2 y llegando a tapar la mirilla:

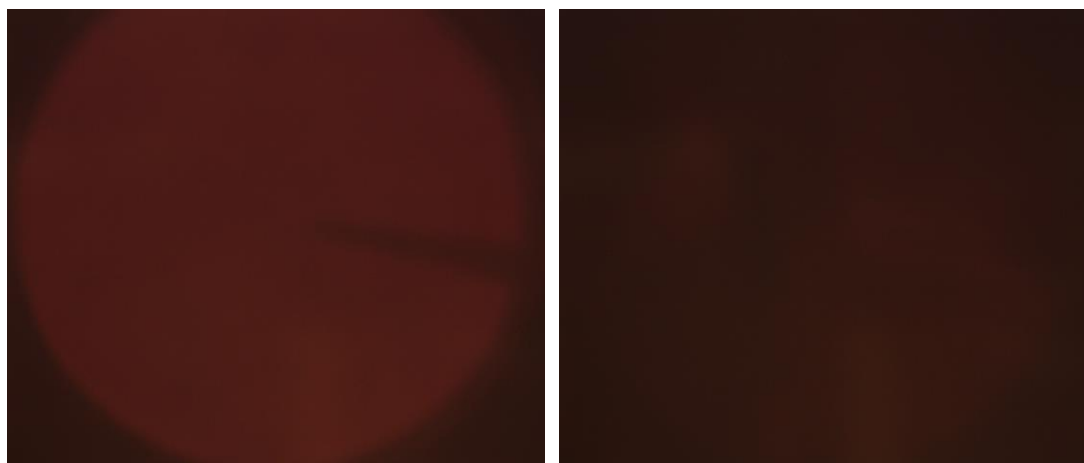


Figura 5.39 Frame donde la termocupla es apenas visible y donde la mirilla es obstruida por completo

Algo a destacar es como, debido a la turbulencia presente en el reactor y como las partículas en suspensión se distribuyen, podemos ver que la diferencia de temperatura entre la zona de reacción 1 y 2 disminuye:

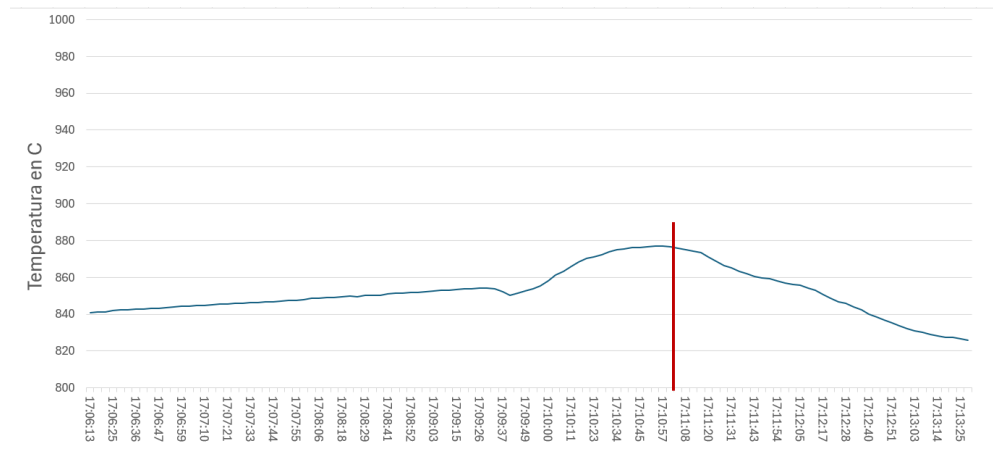


Figura 5.40 Temperatura en la zona de reacción 1 para la prueba 1

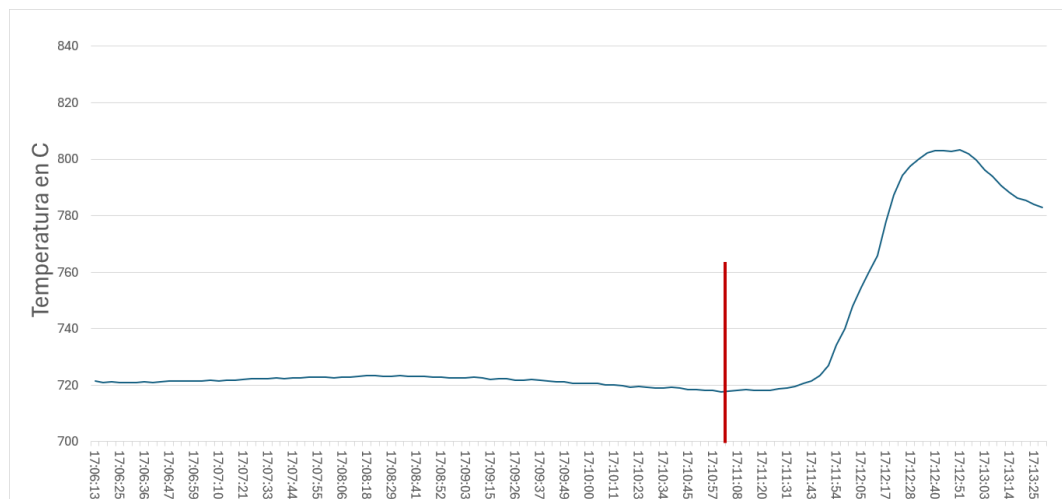


Figura 5.41 Temperatura en la zona de reacción 2 para la prueba 1

Consideramos esta prueba como un éxito ya que, si bien no se tomaron en consideración los modelos matemáticos, dado a que estos fueron obtenidos a partir de condiciones ideales y no lograron representar correctamente el comportamiento de nuestro reactor, logramos estimar los parámetros buscados del comportamiento de las burbujas presentes. Estos parámetros son resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 5.4 Resultados de la prueba 2

Régimen	Burbeante	Slugging
Diámetro promedio	0.013[m]	0.062 [m]
Frecuencia promedio de ruptura	3.9[s ⁻¹]	10.4 [s ⁻¹]
Tasa de aparición	4 [burbujas/seg]	3 [burbujas/seg]
Zona de aparición	Pegada a la pared izquierda	Variable, pero no centrada

5.3. Prueba 3: 28/01/2025

Para esta prueba se utilizó sílice seca con los siguientes datos:

Tabla 5.5 Datos de la carga P3

Densidad del solido	1500 kg/m ³
Masa del solido	8 kg
Volumen del solido	0.00533 m ³
Diámetro ponderado de la partícula (d80)	383e-6 m
Densidad del gas (a 850°C)	0.314 kg/m ³
Viscosidad del gas	4.45e-5 kg/m*s
Numero de Arquímedes	131
Altura mínima (Hmf)	0.58 m

Podemos notar como la carga tiene leves diferencias, aun así, esta carga pertenece al grupo B de Geldart. Otra diferencia que destacar es la diferencia de temperatura entre la zona 1 y 2, siendo la diferencia en esta prueba menor:

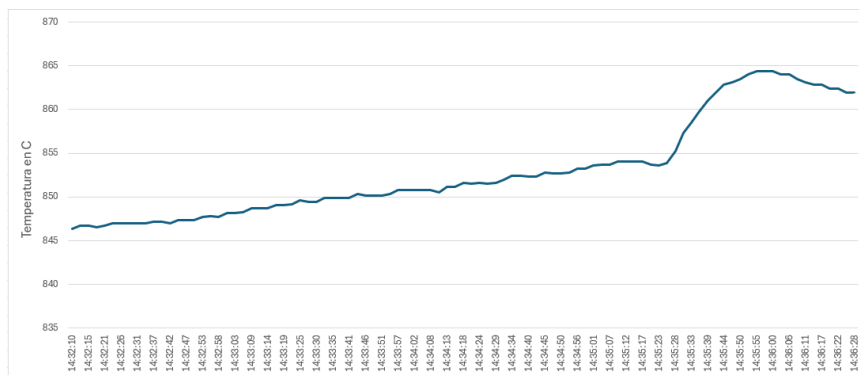


Figura 5.42 Temperatura en la zona 2 para la prueba 3

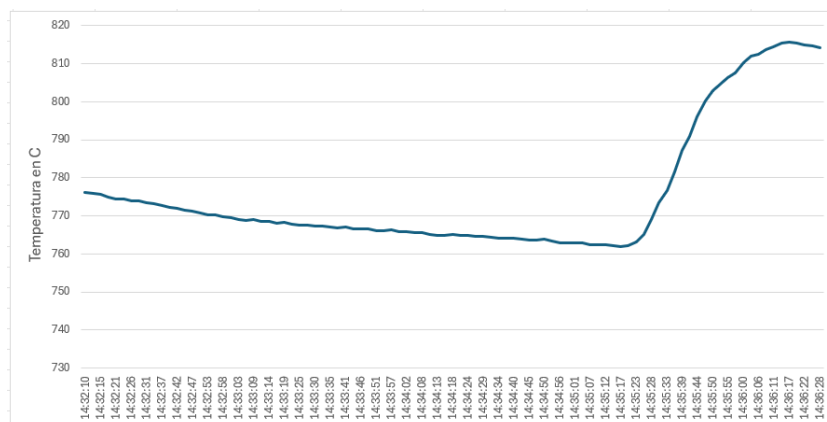


Figura 5.43 Temperatura en la zona 2 para la prueba 3

Para verificar si el comportamiento será similar o distinto, seteamos el caudal de entrada del agente fluidizador a 8 [Lpm], esta corresponde a la velocidad utilizada en la prueba anterior.

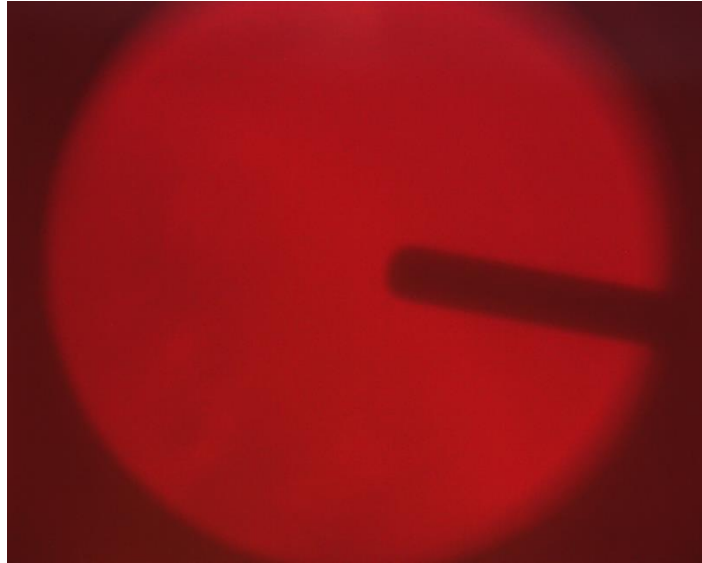


Figura 5.44 Frame a $U=8\text{Lpm}$

A esta velocidad, a diferencia de la prueba anterior, nos encontramos en un régimen de slug, por lo que el comportamiento será diferente. Estimamos la velocidad mínima de fluidización para esta prueba de la misma forma que la prueba anterior, llegando a $U_{mf} = 4 [\text{Lpm}] = 0.028 [\text{m/s}]$:

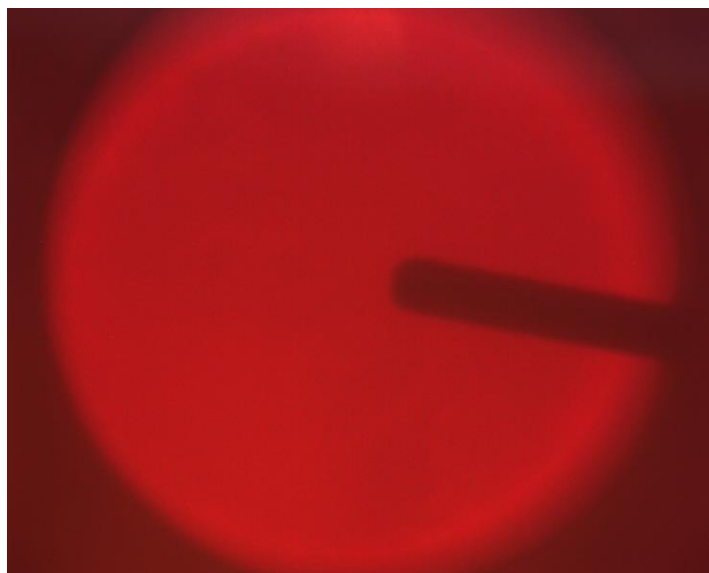


Figura 5.45 Frame para determinar U_{mf}

Luego calculamos el histograma para determinar en qué componente es mejor basar nuestro monitoreo:

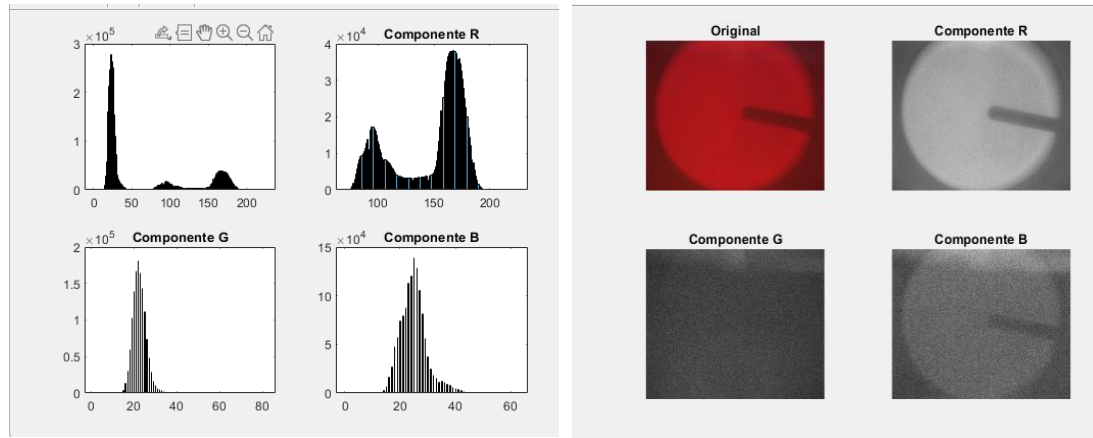


Figura 5.46 Histograma para $U=0.028$ m/s

Podemos apreciar cómo es la componente roja la que nos entrega más información, sin embargo, realizando el análisis frame a frame llegamos a la conclusión que es imposible de visualizar las burbujas de una manera clara y precisa como en la prueba anterior. Una explicación a este resultado puede ser que en esta prueba la diferencia de temperatura entre la zona de reacción 1 y 2 es menor, por ende, la zona de reacción 2 está a una temperatura mayor, esto hace que emita mayor energía/temperatura que se traduce en ruido para nuestra foto. Si comparamos las fotos de la prueba 2 y 3 podemos ver claramente una diferencia en la intensidad de los colores:

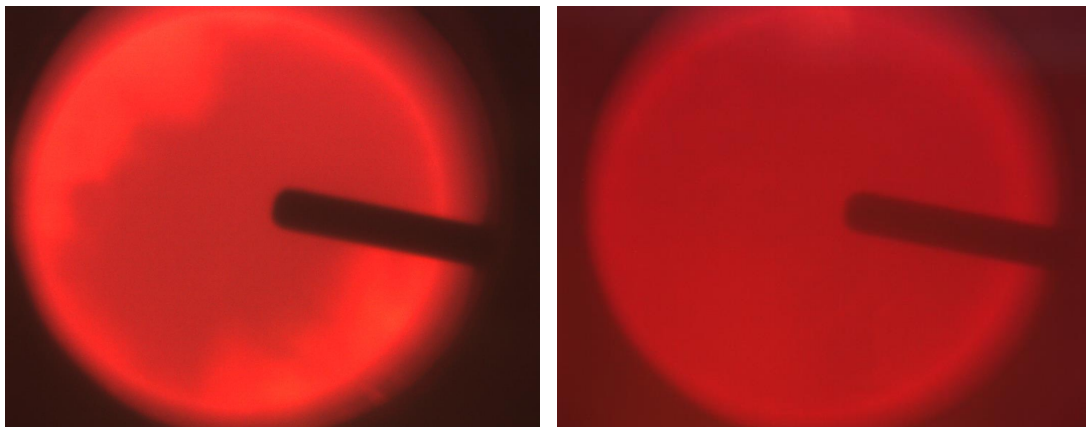


Figura 5.47 Frames de la prueba 2 y 3

Es por esta razón que en este régimen no se obtuvo información sobre la morfología o la frecuencia de las burbujas, sin embargo, se realizó un análisis en la variación de los

pixeles en ciertas zonas de interés con el fin de corroborar si las burbujas tienden a aparecer a un costado del reactor. Para ello en una primera instancia se dividió la imagen en dos, izquierda y derecha, y en cada una de ellas se calcula la desviación estándar de los pixeles del video en el canal rojo:

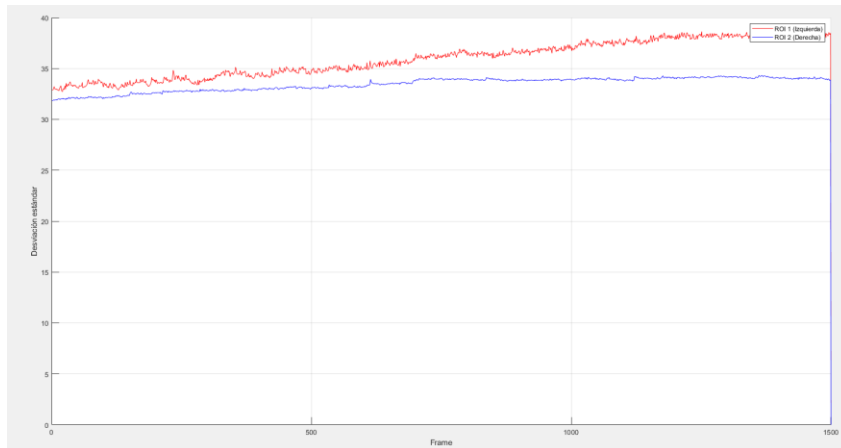


Figura 5.48 Desviación estándar con la imagen dividida en dos

Podemos ver como la parte izquierda del video, grafica roja, presenta una mayor desviación que la parte derecha, grafica azul. Esto se puede interpretar de varias maneras, una de ella es como nos da indicios de que en la zona izquierda del video hay mayor movimiento que en la zona derecha, este movimiento se atribuye a la aparición de burbujas. Para reforzar este análisis se calcula la desviación estándar en dos regiones de interés más específicas como lo muestra la siguiente imagen:

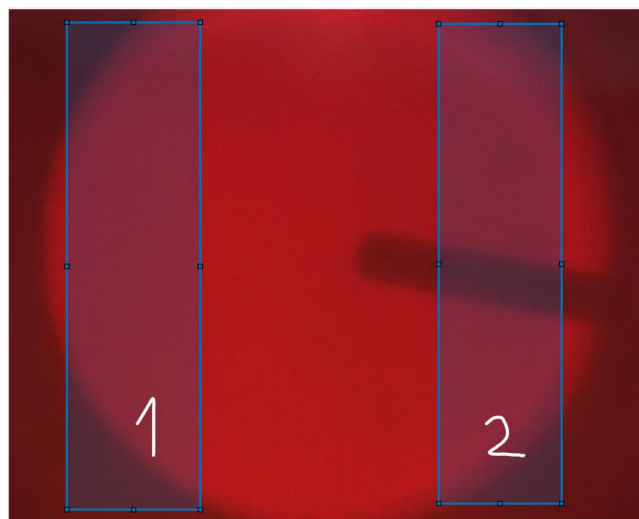


Figura 5.49 Selección de las nuevas regiones de interés

La desviación estándar de estas dos regiones queda graficada de la siguiente manera:

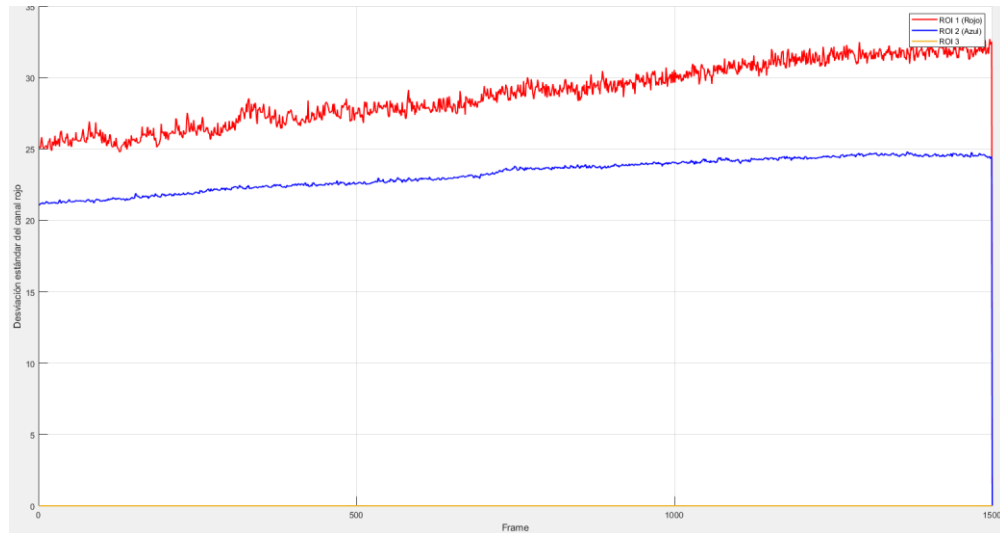


Figura 5.50 Desviación estándar de las dos regiones de interés

Podemos ver como nuevamente la región correspondiente a la zona izquierda del video, grafica roja, presenta una desviación mayor a la zona derecha. Corroborando así que la zona izquierda tiene una mayor actividad que la derecha.

En el caso del régimen de slugs utilizando el mismo método que en la prueba anterior se determinó que la velocidad mínima de slug es de 0.039 [m/s] y a esta velocidad la cama tiene una altura de 0.60[m]. Realizamos el mismo procedimiento para corroborar que las burbujas sean visibles, por lo que calculamos el histograma de las imágenes:

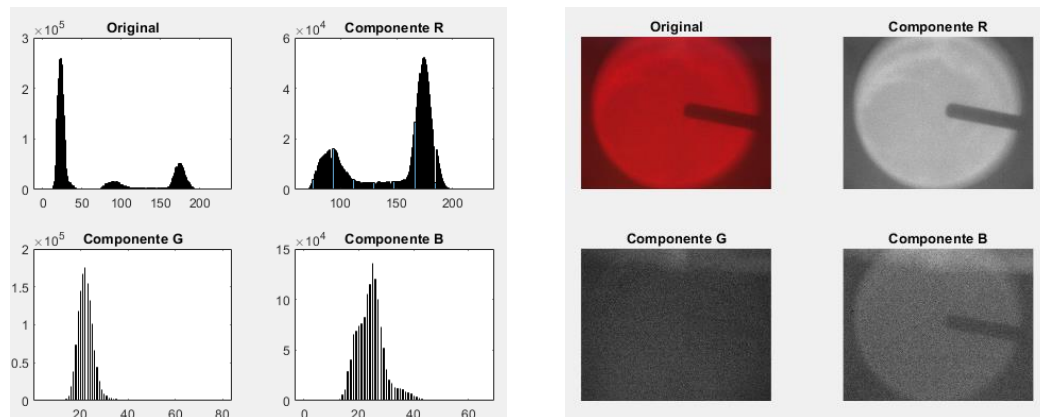


Figura 5.51 Histograma para un régimen de slugs

Podemos ver que se ve mejor en el canal rojo. Por lo que volvemos a considerar paquetes de 25 frames para divisar burbujas con la primera burbuja haciendo su aparición a partir del frame 9 alcanzando su tamaño máximo y eventualmente desapareciendo en el frame 11:

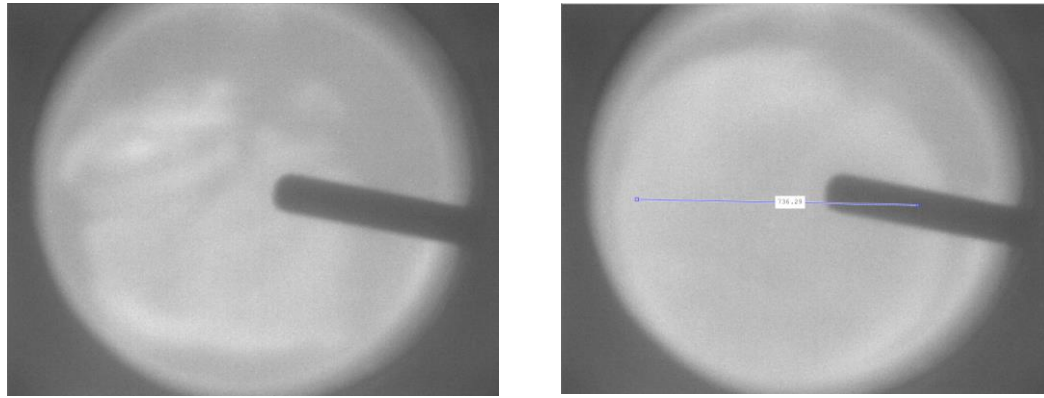


Figura 5.52 Frame 9 y 11

Esta burbuja tiene un diámetro estimado de 0.092 [m] y una frecuencia de ruptura de $8.33 [s^{-1}]$. La siguiente burbuja hace su aparición en el frame 22, alcanzando su tamaño máximo en el frame 23:

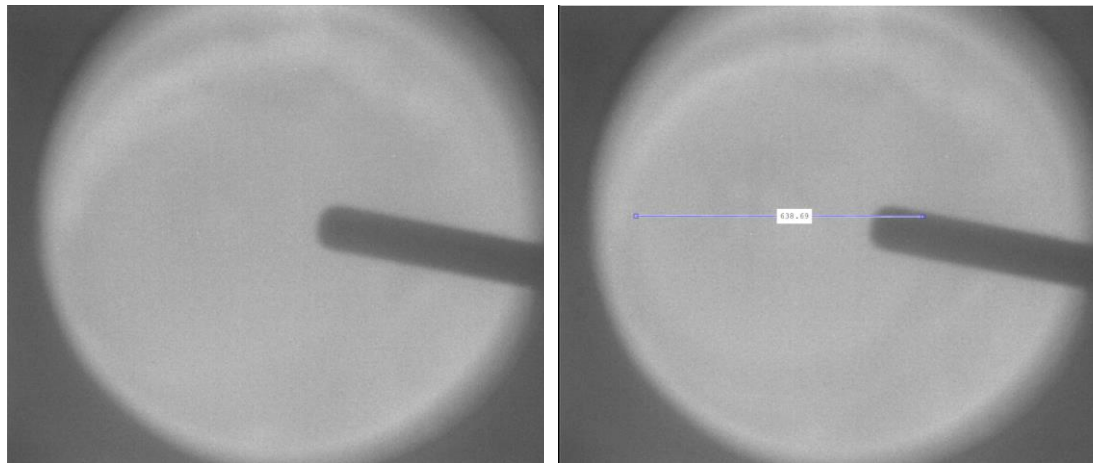


Figura 5.53 Frame 22 y 23

Con un diámetro estimado de 0.08 [m] y una frecuencia de ruptura de $12.5[s^{-1}]$. Estas son todas las burbujas encontradas en el primer paquete de 25, recalcando como aquí, de la misma forma que pruebas anteriores, la burbuja aparece axialmente asimétrica. Analizamos un segundo paquete de frames, en donde la primera burbuja hace su aparición en el frame 13 hasta el 14:

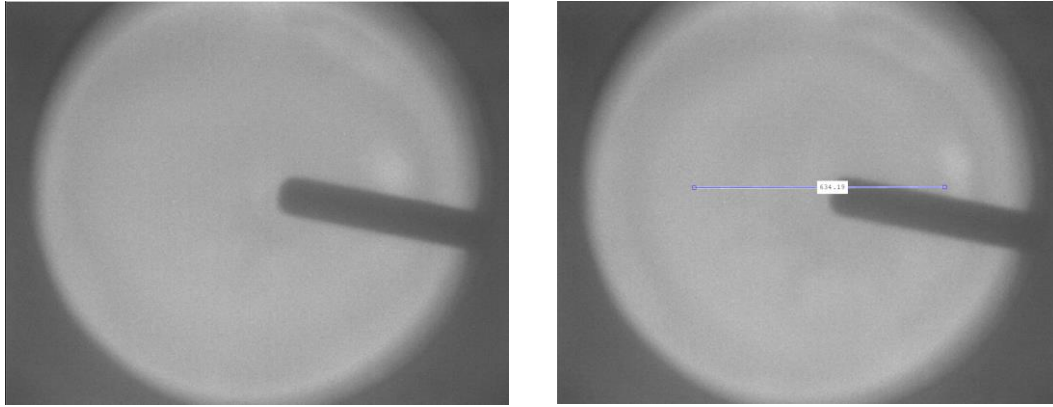


Figura 5.54 Frame 13 y 14

Esta burbuja presenta un diámetro estimado de 0.079[m] y una frecuencia de ruptura de $12.5[s^{-1}]$. Esta es la única burbuja que se logra divisar con claridad durante este paquete, ya que se hace presente una nube de partículas en suspensión. Analizamos un tercer paquete donde divisamos una sola burbuja formándose en el frame 9 hasta el 10:

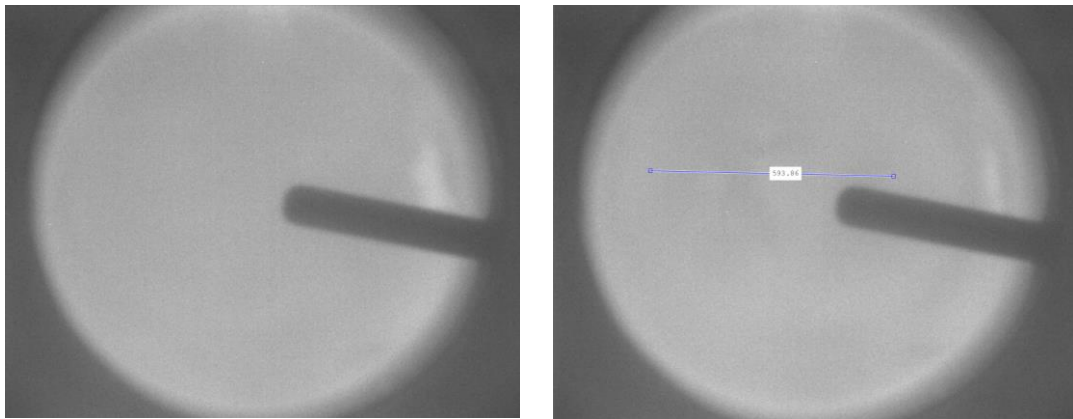


Figura 5.55 Frame 9 y 10

Teniendo una frecuencia de ruptura de $12.5[s^{-1}]$ y un diámetro de 0.074[m]. Realizamos el mismo análisis estadístico que en la prueba anterior:

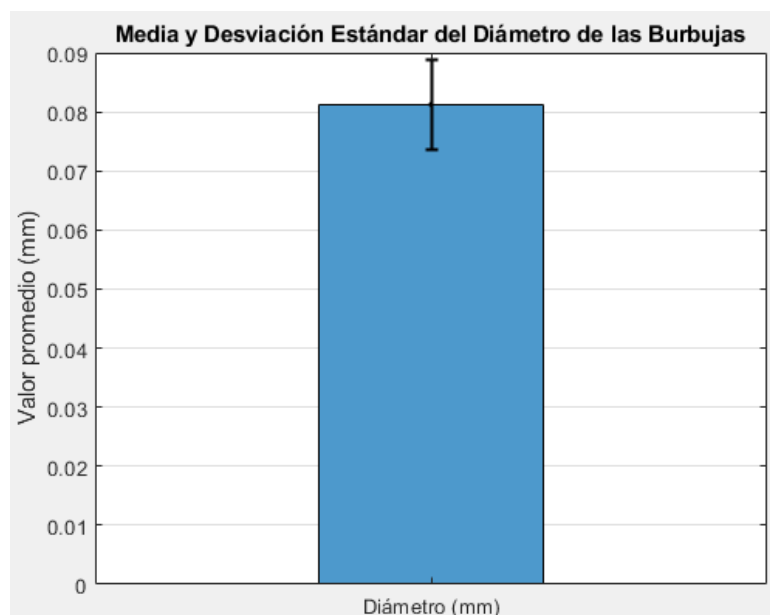


Figura 5.56 Media y desviación estándar del diámetro de las burbujas en un régimen de slug

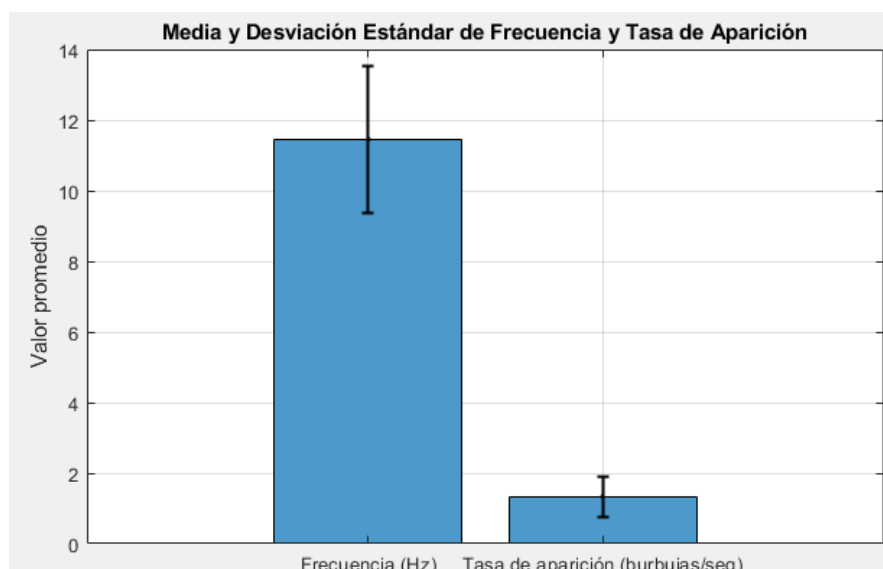


Figura 5.57 Media y desviación estándar para la frecuencia de ruptura y tasa de aparición de las burbujas en régimen de slug

De esto podemos decir que la burbuja tiene un diámetro promedio de 0.081[mm] con una desviación estándar de 0.007 [mm], una frecuencia de ruptura de 11.4[s⁻¹] con una desviación estándar de 2 [s⁻¹] y una tasa de aparición de 1.3[burbujas/seg] con una desviación estándar de 0.57 [burbujas/seg]. En este análisis del régimen de slugging se pueden estimar los siguientes valores:

Tabla 5.6 Resultados para el régimen de slugg P3

Régimen	Slugging
Diámetro promedio de la burbuja.	0.081[m]
Frecuencia de ruptura promedio.	11.4[s ⁻¹]
Tasa de aparición.	1.3 [burbujas/seg]
Zona de aparición	Variable, no centrada.

Como podemos comparar, en esta tabla y la tabla (5.4), para el régimen de slugg los resultados presentan diferencias mínimas en la mayoría de las variables, a excepción de la tasa de aparición. Esto es interesante, ya que las condiciones operacionales, como el tipo de carga, la temperatura del reactor y la velocidad espacial del fluido, no son las mismas en ambos casos. Este comportamiento sugiere que a pesar de las diferencias en las condiciones operacionales el régimen de slugg se mantuvo estable, por lo que al trabajar en condiciones idénticas se espera resultados aún más consistentes

En el régimen turbulento, al igual que en la prueba anterior, la carga presente en el reactor queda distribuido por todo el reactor, llegando incluso a tapar la mirilla. Esto ocurre a unos $U=20$ [Lpm].

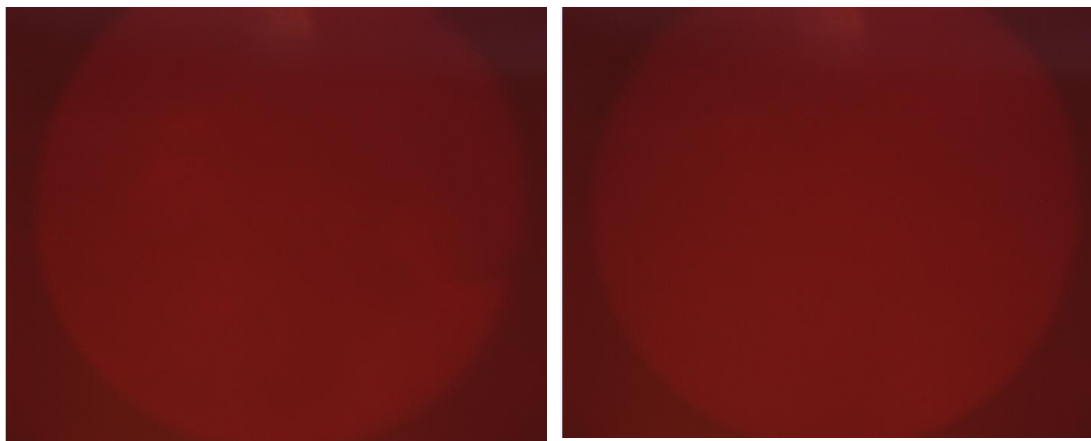


Figura 5.58 Régimen turbulento

5.4. Análisis de Optical flow

Con la ayuda de Matlab podemos calcular el OpticalFlow de un video con la intención de representar vectorialmente el movimiento presente en el video. Dado que el video tiene una visión por la parte superior del reactor, el movimiento que el algoritmo detecta será la interfaz de la burbuja creciendo a hasta alcanzar su tamaño máximo y reventar. En este caso utilizaremos el algoritmo de Lucas-Kanade para estimar el flujo óptico. Además, utilizaremos el video capturado en régimen burbujeante de la prueba 2, en particular el canal verde de esta imagen y los primeros 75 frames para así tener el flujo óptico de los mismos segundos analizados en la sección 3.2. Podemos ver como el flujo óptico del video se concentra prioritariamente en la zona superior izquierda del reactor dejando en evidencia la formación de burbujas con una tendencia en esa zona ya que la zona derecha del reactor no presenta mayor flujo.

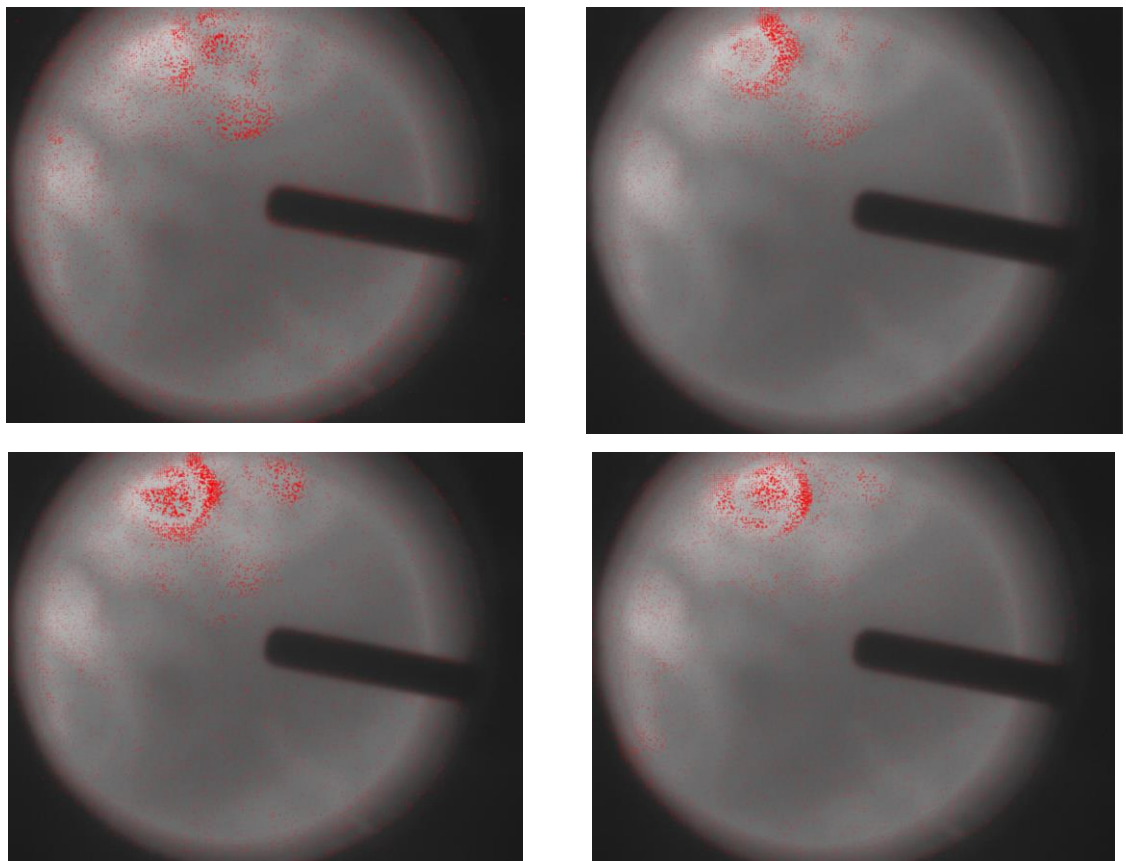


Figura 5.59 Secuencia de frames desde 19 al 22

El flujo óptico en la imagen queda representado como una flecha roja representando la dirección y magnitud del vector de flujo generado. Si realizamos un zoom al frame 22 donde es visible la burbuja podemos ver dichas flechas indicando como la interfaz se desplaza hacia afuera del centro de la burbuja indicándonos así que va en crecimiento.

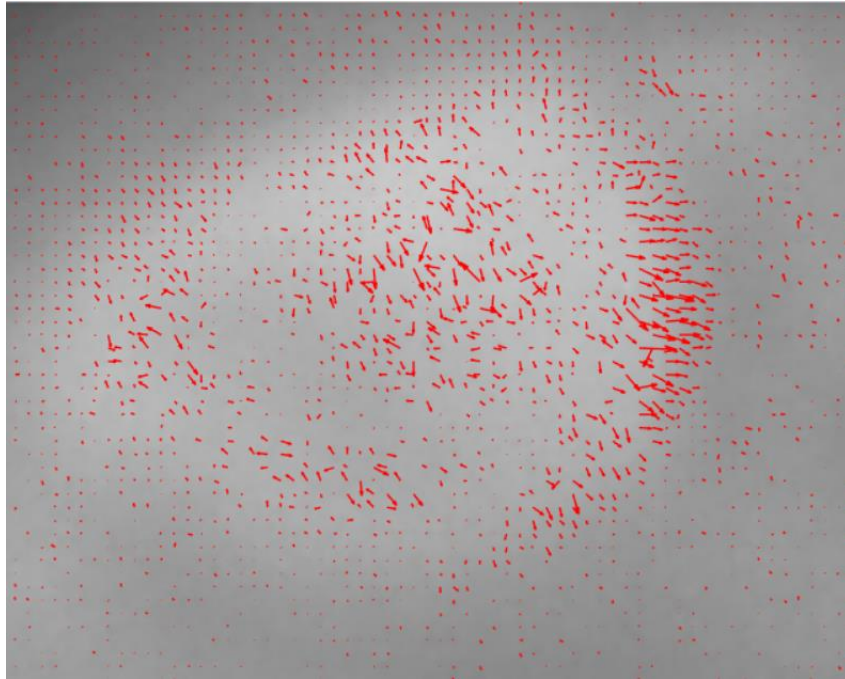


Figura 5.60 Vectores de flujo en el frame 22

Conclusión

A lo largo de este estudio se ha logrado caracterizar de manera detallada el comportamiento de las burbujas formadas en la superficie de un lecho fluidizado, esto se logró mediante el análisis digital de imágenes tomadas por una cámara en la banda VISNIR. Se implemento una metodología de análisis para una secuencia de imágenes tomadas en los distintos regímenes de operación del reactor con la idea de obtener información cuantitativa sobre el comportamiento de la burbuja, tales como su diámetro, su frecuencia de ruptura, la tasa y zona de aparición. Los ensayos realizados arrojaron resultados razonables y coherentes por lo que se demostró que la metodología utilizada es efectiva y proporciona una alternativa para el monitoreo de sistemas fluidizados. Sumado a esta metodología se implementó un análisis de flujo óptico con la intención de estudiar el desplazamiento de la interfaz de la burbuja para demostrar como esta se expande hasta alcanzar su tamaño máximo y reventar. Demostrando además que, si bien existen diferencia entre los distintos parámetros operaciones de los ensayos, como la temperatura del reactor, el material cargado o la velocidad del fluido, los resultados no difieren significativamente entre ensayos, por lo que se espera que si dichas condiciones operacionales son imitadas los resultados deberían ser iguales.

A partir de nuestros resultados se proponen varias posibilidades para futuras investigaciones. Uno de ellos es realizar estudios con distintos tipos de materiales, ya que en estos ensayos se utilizo una carga de sílice seca la cual no genera una reacción donde se produce gas por lo que no se analizó si esta generación de gas puede presentar problemas de visualización a la hora de analizar la secuencia de imágenes. Por otro lado, también se recomienda realizar ensayos en un reactor de escala mayor, con una instrumentación mas precisa y reemplazar la cámara por una de mejor calidad. Finalmente se recomienda variar el plato de toberas y caracterizar el comportamiento de las burbujas en función de él.

Referencias

- [1] J. R. Grace, X. Bi y N. Ellis, *Essentials of Fluidization Technology*, Weinheim, Alemania, Wiley-VCH, 2020.
- [2] D. Geldart, «The Effect of Particle Size and Size Distribution on the Behavior of Gas-Fluidized Beds,» de *Powder Technology*, Elsevier Sequoia, 1971, p. 201.
[https://doi.org/10.1016/0032-5910\(72\)83014-6](https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)83014-6)
- [3] S. Mori y C. Y. Wen, «Estimation of Bubble Diameter in Gaseous Fluidized Beds,» *AIChE Journal*, vol. 21, n° 1, pp. 109-115, 1975.
<https://doi.org/10.1002/aic.690210114>
- [4] D. Geldart, «Expansion of Gas Fluidized Beds,» de *Powder Research*, Ind. Eng. Chem. Res, 2004, pp. 5802-5809.
<https://doi.org/10.1021/ie040180b>
- [5] M. Vollmer y K.-P. Mollman, *Infrared Thermal Imaging*, Weinheim, Alemania, Wiley-VCH, 2010.
- [6] N. Sharmin y R. Brad, «Optimal Filter Estimation for Lucas-Kanade Optical Flow,» *Sensors*, 2012.
<https://doi.org/10.3390/s120912694>
- [7] ThorLabs, «DCC1645C Datasheet,» New Jersey, 2020.
<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=DCC1645C> (28/03/2024)

Anexo A: Código para el análisis y visualización frame a frame

```
clc, clear all, close all

cd('D:\PRUEBA N3\ultima\4lpm');

archivo_tif = '4lpm_1.tif';
info = imfinfo(archivo_tif);
num_imagenes = numel(info);
imagenes = cell(1, num_imagenes);
for k = 1:num_imagenes
    img = imread(archivo_tif, k);
    imagenes{k} = img;
end

%% Histogramas de una imagen individual
close all

k=15;
R=imagenes{k}(:,:,1);
G=imagenes{k}(:,:,2);
B=imagenes{k}(:,:,3);
figure()
subplot(2,2,1); imshow(imagenes{k}); title('Original')
subplot(2,2,2); imshow(R); title('Componente R')
subplot(2,2,3); imshow(G,[]); title('Componente G')
subplot(2,2,4); imshow(B,[]); title('Componente B')
figure()
subplot(2,2,1); histogram(imagenes{k}); title('Original')
subplot(2,2,2); histogram(R); title('Componente R')
subplot(2,2,3); histogram(G); title('Componente G')
subplot(2,2,4); histogram(B); title('Componente B')

%% Almacenar la componente G y ROI
```

```

imagG=cell(1,num_imagenes);
for k=1:num_imagenes
    imagRGB=imagenes{k};
    imagG{k}=imagRGB(:,:,1);
end
seleccionadas = {};
indice = 1;
for k = 1:25
    imtool(imagG{k});
    seleccionadas{indice} = imagG{k};
    indice = indice + 1;
    pause(1);
end

```

Anexo B: Código de estimación de tamaño

```
clc

%Parametros en mm y pixels.
hsensor=4.61; %horizontal del sensor
vsensor=3.69; %vertical del sensor
hpx=1280; %resolucion de la camara horizontal
vpx=1024; %resolucion de la camara vertical
f=50; %distancia focal del lente
D=530+1820-660; %distancia camara-objeto
xobjeto=966.29; %Tamaño horizontal en la imagen (en pixeles)
% yobjeto=601.22; %Tamaño vertical en la imagen (en pixeles)
%Calculo de FOV: HFOV y VFOV.
HFOV=2*atan(hsensor/(2*f));
% VFOV=2*atan(vsensor/(2*f))
%Tamaño del plano
xplano=2*D*tan(HFOV/2);
% yplano=2*D*tan(VFOV/2)
%Tamaño realestimado del objeto
xobjetoest=(xobjeto/hpx)*xplano
% yobjetoest=(yobjeto/vpx)*yplano
```

Anexo C: Código para transformar varios archivos .tif a un video .avi

```
folderPath = 'D:\PRUEBA N3\ultima\umf'; % Ruta de la carpeta con los archivos .tif
outputVideo = 'umf p3.mp4'; % Nombre del archivo de video de salida
frameRate = 25;
filePattern = fullfile(folderPath, '*.tif');
tifFiles = dir(filePattern);
disp(['Número de archivos .tif encontrados: ', num2str(length(tifFiles))]);
videoWriter = VideoWriter(outputVideo, 'Motion JPEG AVI');
videoWriter.FrameRate = frameRate;
open(videoWriter);
for k = 1:length(tifFiles)
    fileName = fullfile(folderPath, tifFiles(k).name);
    info = imfinfo(fileName);
    numFrames = numel(info);
    for i = 1:numFrames
        img = imread(fileName, i); %
        if size(img, 3) == 1
            img = repmat(img, 1, 1, 3);
        end
        writeVideo(videoWriter, img);
        disp(['Procesando archivo: ', tifFiles(k).name, ', fotograma: ', num2str(i)]);
    end
end
close(videoWriter);
disp(['Video guardado como: ', outputVideo]);
```

Anexo D: Código con los modelos matemáticos

```
%Modelo del reactor
clc, clear all,
%% Parametros del reactor
Nor=19*2; %Numero de toberas
T=850; %temperatura del reactor (ZONA1)*
D=0.108; %Diametro del reactor en m
A=(pi*(D^2))/4;
%% Parametros de la carga
pc=1500; %densidad del solido en kg/m3
mc=8; %masa del solido en kg
Vc=0.00533; %Volumen del solido m3
g=9.8; %fuerza G m/s2
p=0.314; %densidad kg/m3 del aire a T (tabla)
u=4.45*(10^(-5)); %viscosidad del aire a T en kg/ms (tabla)
dp=383*(10^(-6)); %diametro ponderado de las particulas (excel)
Ar=(p*(pc-p)*(dp^3)*g)/(u^2) %Numero de arquimides.
%% Calculo de minima fluidizacion y minimo de slugg (teorico)
if Ar<= 10^3
    Umf=(0.00061*g*(pc-p)*(dp^2))/(u) %AGREGAR A LA MEMORIA
elseif Ar >= 10^7
    Umf=0.202*sqrt((g*(pc-p)*dp)/(p))
end
Hmf=(Vc)/(pi*(D/2)^2) %altura del particulado estatico en m.
% Regimen burbujeante
%% Expansion
U=0.028;%8LPM velocidad de la muestra en m/s (Excel)
```

```

Umf=0.0296;
Y=1.64*Ar^0.2635;
H1=0.4*Hmf;
dbm1=2.59*(((U-Umf)*A)/(g^0.5))^0.4;
db01=1.38*(((U-Umf)*A)/((g^0.5)*Nor))^0.4;
db1=dbm1-((dbm1-db01)*exp((-0.3*H1)/D));
ub1=(0.711*sqrt(g*db1))+(U-Umf);
H2=0;
dbm2=2.59*(((U-Umf)*A)/(g^0.5))^0.4;
db02=1.38*(((U-Umf)*A)/((g^0.5)*Nor))^0.4;
db2=dbm2-((dbm2-db02)*exp((-0.3*H2)/D));
ub2=(0.711*sqrt(g*db2))+(U-Umf);
H3=Hmf;
dbm3=2.59*(((U-Umf)*A)/(g^0.5))^0.4;
db03=1.38*(((U-Umf)*A)/((g^0.5)*Nor))^0.4;
db3=dbm3-((dbm3-db03)*exp((-0.3*H3)/D));
ub3=(0.711*sqrt(g*db3))+(U-Umf);
ubprom=(ub1+ub2+ub3)/3;
Hexp1=Hmf*((ubprom)/(ubprom-(Y*(U-Umf))));
H1=0.4*Hexp1;
dbm1=2.59*(((U-Umf)*A)/(g^0.5))^0.4;
db01=1.38*(((U-Umf)*A)/((g^0.5)*Nor))^0.4;
db1=dbm1-((dbm1-db01)*exp((-0.3*H1)/D));
ub1=(0.711*sqrt(g*db1))+(U-Umf);
H3=Hexp1;
dbm3=2.59*(((U-Umf)*A)/(g^0.5))^0.4;
db03=1.38*(((U-Umf)*A)/((g^0.5)*Nor))^0.4;
db3=dbm3-((dbm3-db03)*exp((-0.3*H3)/D));

```

```

ub3=(0.711*sqrt(g*db3))+(U-Umf);
ubprom=(ub1+ub2+ub3)/3;
Hexp=Hmf*((ubprom)/(ubprom-(Y*(U-Umf)))) %altura del lecho a la cual las burbujas
reventaran en m
R=Hexp/Hmf;
dH=Hexp-Hmf %diferencia de alturas en m
%% Estimaciones para comprar.
dbm=2.59*(((U-Umf)*A)/(g^0.5))^0.4
db0=1.38*(((U-Umf)*A)/((g^0.5)*Nor))^0.4
db=dbm-((dbm-db0)*exp((-0.3*Hexp)/D))
ub=(0.711*sqrt(g*db))+(U-Umf)
eb=(U-Umf)/(ub)
fb=(6.47*10^-4)*((U/Umf)^0.454)*(g/Umf)
%Regimen de slug
%% Expansion
clc
Umf=0.055;
% Ums=Umf+0.07*sqrt(g*D);
U=0.068; %en m/s (Excel)
db=0.5*D %mayor o igual
% us0=0.35*sqrt(g*D) %si la slug es axial
us1=0.49*sqrt(g*D);%si se pega a la pared
% us2=0.18*sqrt(g*D);%si es cuadrada.
B=(U-Umf)/us1;
us=us1+(U-Umf)
Hsmax=((U-Umf)/us)+1)*Hmf
dH2=Hsmax-Hmf %diferencia de alturas en m
% Hexp2=Hmf*(1+B)

```

Anexo E: Desviación estándar con la imagen dividida en dos

```
clc; clear all;

[archivo, ruta] = uigetfile('*.avi', 'Seleccione un archivo de video');

if isequal(archivo, 0)

    disp('No se seleccionó ningún archivo.');
```

return;

```
end

videoPath = fullfile(ruta, archivo);
video = VideoReader(videoPath);
frame = readFrame(video);
[frameHeight, frameWidth, ~] = size(frame);
roi1 = [1, 1, floor(frameWidth / 2), frameHeight];
roi2 = [floor(frameWidth / 2) + 1, 1, frameWidth - floor(frameWidth / 2), frameHeight];
rois = {roi1, roi2};
nRois = length(rois);
numFrames = floor(video.Duration * video.FrameRate);
pixelStdDev = zeros(numFrames, nRois);
frameIdx = 1;
while hasFrame(video)

    frame = readFrame(video);
    redChannel = frame(:, :, 1);

    for i = 1:nRois

        x = round(rois{i}(1));
        y = round(rois{i}(2));
        w = round(rois{i}(3));
        h = round(rois{i}(4));
```

```

    x_end = min(x + w - 1, frameWidth);
    y_end = min(y + h - 1, frameHeight);
    roiPixels = redChannel(y:y_end, x:x_end);
    pixelStdDev(frameIdx, i) = std(double(roiPixels(:)));
end
    frameIdx = frameIdx + 1;
end
figure;
hold on;
plot(1:numFrames, pixelStdDev(:, 1), 'r', 'DisplayName', 'ROI 1 (Izquierda)');
plot(1:numFrames, pixelStdDev(:, 2), 'b', 'DisplayName', 'ROI 2 (Derecha)');
xlabel('Frame');
ylabel('Desviación estándar');
legend;
grid on;
hold off;

```

Anexo F: Desviación estándar para ROI

```
clc; clear all;

[archivo, ruta] = uigetfile('*.avi', 'Seleccione un archivo de video');

if isequal(archivo, 0)

    disp('No se seleccionó ningún archivo.');
```

return;

end

videoPath = fullfile(ruta, archivo);

video = VideoReader(videoPath);

frame = readFrame(video);

figure, imshow(frame);

title('Seleccione múltiples ROIs y presione Enter cuando termine');

rois = {}; % Celda para almacenar ROIs

roiObjects = []; % Lista de objetos ROI

while true

roi = drawrectangle();

roiObjects = [roiObjects; roi];

waitforbuttonpress;

key = get(gcf, 'CurrentCharacter');

if key == 13 % Código ASCII de Enter

break;

end

end

for i = 1:length(roiObjects)

rois{end+1} = roiObjects(i).Position;

end

close;

```

% Inicializar almacenamiento de datos
numFrames = floor(video.Duration * video.FrameRate);
nRois = length(rois);
pixelStdDev = zeros(numFrames, nRois);
frameIdx = 1;
while hasFrame(video)
    frame = readFrame(video);
    redChannel = frame(:, :, 1); % Extraer canal rojo
    [frameHeight, frameWidth] = size(redChannel);

    for i = 1:nRois
        x = round(rois{i}(1));
        y = round(rois{i}(2));
        w = round(rois{i}(3));
        h = round(rois{i}(4));
        x_end = min(x + w, frameWidth);
        y_end = min(y + h, frameHeight);
        x = max(1, x);
        y = max(1, y);
        roiPixels = redChannel(y:y_end, x:x_end);
        pixelStdDev(frameIdx, i) = std(double(roiPixels(:)));
    end
    frameIdx = frameIdx + 1;
end
figure;
hold on;
colors = lines(nRois);
for i = 1:nRois

```

```

    if i == 1
        plot(1:numFrames, pixelStdDev(:, i), 'r', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'ROI 1
(Rojo)');
    elseif i == 2
        plot(1:numFrames, pixelStdDev(:, i), 'b', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'ROI 2
(Azul)');
    else
        plot(1:numFrames, pixelStdDev(:, i), 'Color', colors(i, :), 'LineWidth', 1.5, ...
            'DisplayName', ['ROI ' num2str(i)]);
    end
end
xlabel('Frame');
ylabel('Desviación estándar del canal rojo');
title('Desviación Estándar en el Canal Rojo por Frame');
legend;
grid on;
hold off;

```

Anexo G: Optical Flow

```
video = VideoReader('C:\Users\Vinacho\Pictures\fotomemoria\Prueba N2\ultinma\ a 8 LPM\ a
8LPM.avi');

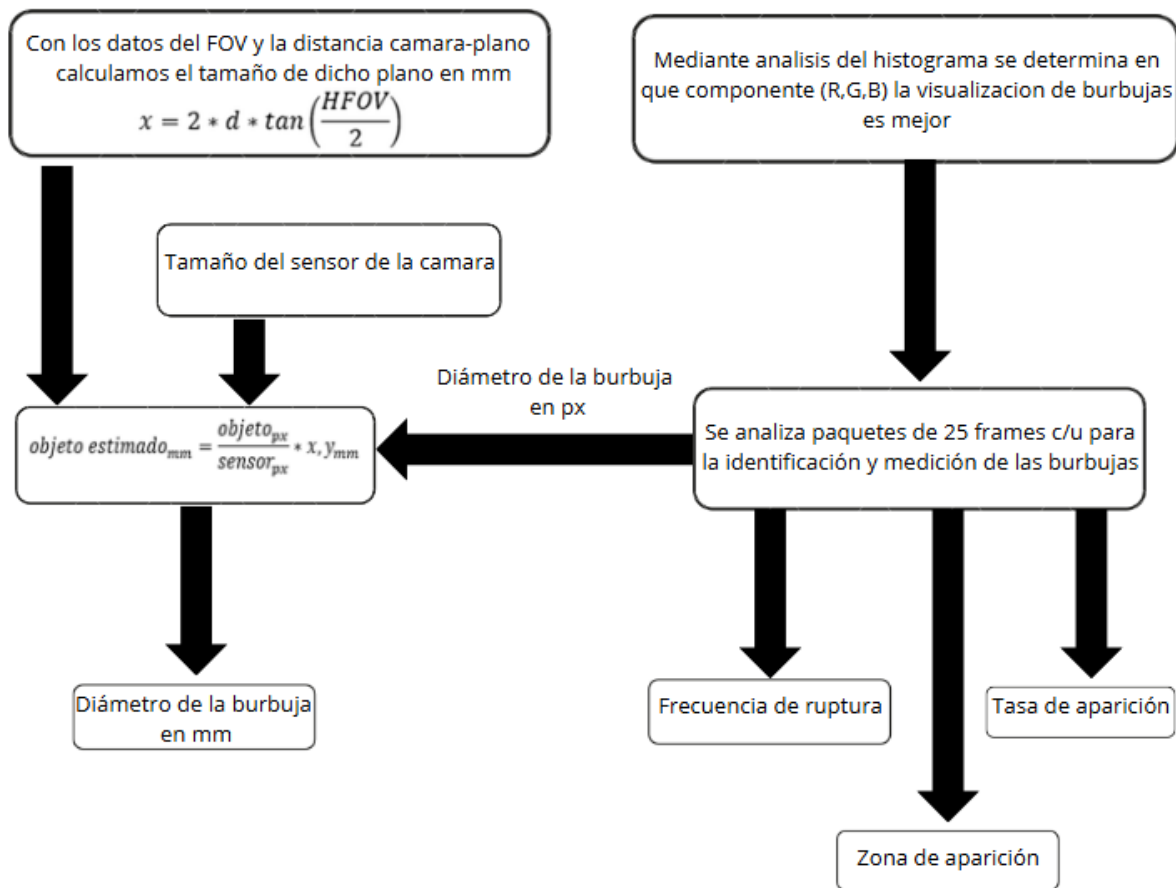
opticFlow = opticalFlowLK('NoiseThreshold', 0.00001, 'WindowSize', 51);

prompt = 'Ingrese los frames que desea visualizar (ejemplo: [10 20 30] o [5:5:50]): ';
framesSeleccionados = input(prompt);

frameNum = 0;

while hasFrame(video)
    frameNum = frameNum + 1;
    frameRGB = readFrame(video);
    if ismember(frameNum, framesSeleccionados)
        frameGray = rgb2gray(frameRGB);
        frameGray = imgaussfilt(frameGray, 1);
        flow = estimateFlow(opticFlow, frameGray);
        step = 5; % Espaciado entre flechas
        [X, Y] = meshgrid(1:step:size(flow.Vx,2), 1:step:size(flow.Vy,1));
        Vx_reduced = flow.Vx(1:step:end, 1:step:end);
        Vy_reduced = flow.Vy(1:step:end, 1:step:end);
        umbral = 0.05; % Ajustar según sea necesario
        mask = (abs(Vx_reduced) > umbral) | (abs(Vy_reduced) > umbral);
        Vx_filtered = Vx_reduced .* mask;
        Vy_filtered = Vy_reduced .* mask;
        figure;
        imshow(frameGray); hold on;
        quiver(X, Y, Vx_filtered, Vy_filtered, 'r', 'LineWidth', 1, 'AutoScaleFactor', 2);
        hold off;
        title(['Flujo Óptico en Frame ', num2str(frameNum)]);
    end
end
```

Anexo H: Diagrama de flujo de la metodología de análisis de imagen



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA

RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO

Departamento	: Departamento de Ingeniería Eléctrica
Carrera	: Ingeniería civil electrónica
Nombre del memorista	: Ignacio Andres Roa Campos
Título de la memoria	: Análisis digital de burbujas en lecho fluidizado mediante video en la banda VISNIR
Fecha de la presentación oral	: 09/04/2025
Profesor(es) guía	: Sergio Torres Inostroza
Profesor(es) revisor(es)	: Francisco Pérez y Roberto Parra
Concepto	:
Calificación	:

Resumen (máximo 200 palabras)

Un reactor de lecho fluidizado es un reactor químico el cual utiliza un fluido, sea gas o líquido, para lograr que un material particulado, como minerales, concentrados metálicos, materiales orgánicos, y un extenso etc, logre alcanzar propiedades físicas similares a las de un fluido. Esto determina que el sistema fluido – material particulado alcancen una muy buena transferencia de calor y masa lo que permite que sistemas reactivos tengan una alta eficiencia de las reacciones químicas que ocurran en el reactor. Por esta razón, este reactor es utilizado en distintas industrias como los procesos de metalurgia química, tratamiento de alimentos, industria farmacéutica, refinación de petróleo, entre otras. Resulta natural buscar monitorear estos reactores para tener un buen diagnóstico del proceso químico que tiene lugar en el reactor midiendo la mayor cantidad de variables involucradas para de esta manera controlar la operación y hacerla lo más eficiente posible. Este trabajo estudia la viabilidad de medir la morfología, frecuencia de ruptura y distribución de las burbujas formadas en un reactor de lecho fluidizado.