



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR DE BURBUJAS PARA
EVALUAR LA INFLUENCIA DE UN CAMPO ELÉCTRICO EN UN
FLUJO MULTIFÁSICO**

AUTOR: QUINGA YANCHALUISA, EDWIN MAURICIO

DIRECTOR: ING. NARVÁEZ MUÑOZ, CHRISTIAN PATRICIO

SANGOLQUÍ

2019

CERTIFICADO TUTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“IMPLEMENTACIÓN DE UN REACTOR DE BURBUJAS PARA EVALUAR LA INFLUENCIA DE UN CAMPO ELÉCTRICO EN UN FLUJO MULTIFÁSICO”***, fue realizado por el señor ***Quinga Yanchaluisa, Edwin Mauricio*** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar, para que lo sustente públicamente.

Sangolqui, 28 de enero del 2019

Ing. Christian Patricio Narváez Muñoz, MSc

DIRECTOR

AUTORIA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Quinga Yanchaluisa, Edwin Mauricio**, declaro que el contenido, desarrollado, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“Implementación de un reactor de burbujas para evaluar la influencia de un campo eléctrico en un flujo multifásico”*** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 28 de enero del 2019

Quinga Yanchaluisa, Edwin Mauricio

C.C.: 1721735130

AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Quinga Yanchaluisa, Edwin Mauricio**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: ***“Implementación de un reactor de burbujas para evaluar la influencia de un campo eléctrico en un flujo multifásico”*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 28 de enero del 2019



Quinga Yanchaluisa, Edwin Mauricio

C.C.: 1721735130

DEDICATORIA

A mi familia por ser mi orgullo, especialmente a mi madre María por ser la persona que siempre me brindó su apoyo incondicional constantemente en todo el transcurso de mi vida universitaria, aunque hoy ya no estés conmigo todo este sacrificio te lo dedico por brindarme todo tu tiempo.

AGRADECIMIENTO

A mi madre, por ser la persona que nunca dejo de creer en mí a pesar de las muchas veces que te falle como hijo.

A mi padre Luis, por brindarme todo su apoyo en todos los momentos más difíciles de mi vida, también agradecerle de todo corazón por toda su ayuda mutua de sus conocimientos para culminar este proyecto.

A mis hermanos Patricio y Xavier, estoy muy agradecido con ustedes por todo el apoyo mutuo brindado durante estos años de mi vida cotidiana.

A mis hermanos Klay, Verónica y Wilson, a pesar de no haber tenido la suficiente confianza en mi persona, siempre estuvieron ahí apoyándome con sus críticas.

A todas aquellas personas, que con el pasar del tiempo se convirtieron en grandes amigos aunque algunos de ellos ya no estén, gracias por todas las experiencias vividas y compartidas.

A Christian Narváez, por tener la paciencia suficiente y el apoyo brindado en el desarrollo del proyecto de investigación.

Edwin Quinga

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Definición del problema.....	1
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivo específico	3
1.4 Alcance del proyecto	3
1.5 Justificación e importancia	4
CAPÍTULO II.....	5
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Reactores multifásicos	5
2.1.1 Clasificación de los reactores multifásicos.....	6
2.1.2 Características de conectores.....	7
2.2 Reactor de burbujas	8

2.2.1 Principio de funcionamiento del reactor de burbujas.....	8
2.2.2 Componentes básicos de un reactor de burbujas	9
2.2.3 Parámetros técnicos del reactor de burbujas	11
2.3 Parámetros de la solución	11
2.3.1 Densidad.....	11
2.3.2 Conductividad eléctrica	12
2.3.3 Tensión superficial	13
2.3.5 Viscosidad.....	14
2.4 Parámetros del proceso	15
2.4.1 Voltaje	15
2.4.2 Caudal.....	16
2.4.3 Presión.....	17
2.4.4 Diámetro de la boquilla	18
2.5 Parámetros ambientales	22
2.6 Modelos para dinámica de burbujas.....	22
2.6.1 Modelo de formación de las burbujas	23
2.6.2 Efectos de las fuerzas sobre las burbujas dinámicas.....	24
2.6.3 Comportamiento de la burbuja en un campo eléctrico	27
2.6.4 Efecto del campo eléctrico de la burbuja en diferentes direcciones.....	29
2.6.5 Comportamientos de la burbuja en un flujo.....	31
2.6.6 Burbujas en fluidos newtonianos.....	32
2.7 Campo eléctrico	34
2.7.1 Flujo eléctrico	35
2.7.2 Celdas eléctricas.....	35

2.7.3 Tipos de celdas eléctricas.....	36
2.8 Flujo multifásico.....	37
2.8.1 Fluido multifásico	38
2.8.2 El fluido	38
CAPÍTULO III.....	42
3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIALES.....	42
3.1 Diseño mecánico.....	43
3.1.1 Base del reactor de burbujas	43
3.1.2 Recipiente de ensayos.....	45
3.1.3 Tuberías de cobre	47
3.1.4 Recipiente de gas	49
3.2 Diseño hidráulico.....	50
3.2.1 Boquillas	51
3.2.2 Protección de acoples de boquilla.....	52
3.2.3 Controlador de flujo.....	53
3.3 Diseño eléctrico.....	54
3.3.1 Celdas eléctricas.....	54
3.3.2 Soporte del mecanismo para electrodo.....	56
3.3.3 Posicionador de altura en electrodo.....	57
CAPÍTULO IV	58
4. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN	58
4.1 Construcción del Reactor de Burbujas	58
4.2 Proceso de construcción	59
4.2.1 Fabricación del recipiente de vidrio.....	59

4.2.2	Fabricación del sistema hidráulico de los fluidos	60
4.2.3	Fabricación del sistema generador del campo eléctrico	64
4.2.4	Fabricación del sistema mecánico	65
4.2.5	Fabricación de base del reactor de burbujas	66
4.3	Ensamblaje de piezas del reactor de burbujas.....	67
4.3.1	Ensamblaje de los sistemas mecánico, hidráulico y eléctrico	68
4.4	Implementación del reactor de burbujas	71
4.4.1	Inspección de los sistemas aplicados	73
4.4.2	Prueba de funcionamiento del prototipo.....	73
CAPÍTULO V		75
5.	EXPERIMENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	75
5.1	Experimentación.....	75
5.1.1	Equipos e Instrumentos	75
5.1.2	Sistema del reactor de burbujas.....	75
5.1.3	Fluidos de trabajo.....	79
5.1.4	Especificación de parámetros	79
5.1.5	Metodología de trabajo	81
5.2	Análisis de resultados	83
5.2.1	Clasificación de grupos de ensayos experimentales.....	83
5.2.2	Análisis de una burbuja por imágenes digitales	84
5.2.3	Características geométricas de la burbuja	85
5.2.4	Generación de burbujas en dirección ascendente	86
5.2.5	Velocidad	96
5.2.6	Fuerzas de equilibrio sobre una burbuja	109

5.2.7 Análisis de la Influencia del campo eléctrico	112
5.2.8 Comparación de burbujas por un diámetro de ϕ : 0.3 mm y ϕ :0.5 mm.....	116
CAPÍTULO VI	118
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
6.1 Conclusiones.....	118
6.2 Recomendaciones.....	121
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	122
ANEXOS.....	126
A. Planos mecánicos	126
B. Tablas de datos.....	126
C. Parámetros específicos e variables	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un reactor Slurry	8
Figura 2. Esquema de interrelación entre los fluidos líquido y gas	9
Figura 3. Esquema de componentes e instrumentos.....	10
Figura 4. Fuerzas de cohesión y adhesión en la superficie de los fluidos	13
Figura 5. Formas de desprendimiento de burbujas a diversos voltajes	16
Figura 6. Sección de la tubería y boquilla	19
Figura 7. Esquema de aplicación con boquilla de diámetro menor.....	20
Figura 8. Esquema de aplicación con boquilla de diámetro mayor.....	21
Figura 9. Campos eléctricos en una burbuja ascendente.....	28
Figura 10. Esquema de la interfaz de la burbuja liquido-gas	30
Figura 11. Generación de campo eléctrico	34
Figura 12. Flujo eléctrico en área perpendicular	35
Figura 13. Esquema de la celda galvánica	36
Figura 14. Esquema de la celda electrolítica	37
Figura 15. Comportamiento del flujo de burbujas en un líquido.....	38
Figura 16. Láminas de acero inoxidable	44
Figura 17. Estructura de la base del reactor de burbujas en aluminio	44
Figura 18. Isometría de la lámina de acero galvanizado con perforaciones	45
Figura 19. Isometría en conjunto de la base del reactor y placa soporte.....	45
Figura 20. Vidrio templado.....	46
Figura 21. Isometría del recipiente de ensayos en acrílico	47
Figura 22. Tubería capilar de Cobre	47
Figura 23. Dimensionamiento de la sección de la tubería	49
Figura 24. Tipos de recipientes.....	49
Figura 25. Recipiente de Nitrógeno de 2m ³	50
Figura 26. Tipos de Boquillas	51
Figura 27. Tipos de boquillas: (a) Diámetro ϕ 0.3 mm, (b) Diámetro ϕ 0.5 mm,.....	52
Figura 28. Acople plástico macho.....	52

Figura 29. Acople plástico hembra	53
Figura 30. Regulador de flujo.....	54
Figura 31. Características geométricas de los electrodos de cobre	56
Figura 32. Soporte de baquelita con dimensiones.....	56
Figura 33. Tornillo posicionador de nylon	57
Figura 34. Prototipo del reactor de burbujas.....	58
Figura 35. Elaboración de una rosca interna al neplo de 1/8".....	61
Figura 36. Rosca interna de 1/4" a neplo de 1/8".....	61
Figura 37. Conjunto entre el acople y boquilla.....	61
Figura 38. Accesorios para el acople hembra de la boquilla.....	62
Figura 39. Curvatura en la tubería de cobre de 1/4"	62
Figura 40. Acoples de conexión: (a) Tubería de cobre 3/8". (b) Acople tipo macho	63
Figura 41. Protector de nylon para acoples de boquilla.....	64
Figura 42. Placas de cobre.....	64
Figura 43. Placa perforada de cobre	65
Figura 44. Soldadura electrodo tipo I.....	65
Figura 45. Soldadura electrodo tipo II.....	65
Figura 46. Eje de nylon para generar movimiento	66
Figura 47. Soporte aislante del conjunto eje-electrodo tipo II	66
Figura 48. Estructura de base reactor	67
Figura 49. Lamina de acero perforada.....	67
Figura 50. Base reactor de burbujas.....	67
Figura 51. Conexión al recipiente de nitrógeno	72
Figura 52. Conexión con el generador de energía.....	72
Figura 53. Colocación fija de la cámara de alta resolución.....	72
Figura 54. Generación de burbujas sin un campo eléctrico	73
Figura 55. Generación de burbujas con un campo eléctrico.....	74
Figura 56. Sistema del reactor de burbujas	76
Figura 57. Reactor de burbujas	76
Figura 58. Generador de voltaje	77

Figura 59. Cámara Phantom V2512	77
Figura 60. Luces Led I	77
Figura 61. Recipiente de Nitrógeno	77
Figura 62. PC software PCC2.8.....	77
Figura 63. Adaptador Nikon	78
Figura 64. Lente Centrimax K1	78
Figura 65. Lente objetivo MX-2.....	78
Figura 66. Lente objetivo MX-3.....	78
Figura 67. Tipos de burbujas con caudales: (a) $Q_{mín}$, (b) Q_{int} , (c) $Q_{máx}$	81
Figura 68. Diagrama de flujo del proceso de experimentación.....	82
Figura 69. Proceso de digitalización de imágenes mediante un algoritmo	85
Figura 70. Representación de las dimensiones de la burbuja	86
Figura 71. Crecimiento de burbuja a una $P_{mín}$: 500 psi y Q_{cte} : 0.30 lpm.....	88
Figura 72. Crecimiento de burbuja a un $Q_{mín}$: 0.15 lpm y P_{cte} : 2200 psi.....	89
Figura 73. Crecimiento de burbuja a una $P_{mín}$: 500 psi y Q_{cte} : 0.30 lpm.....	91
Figura 74. Desprendimiento a: $Q_{mín}$: 0.15 lpm, Q_{int} : 0.30 lpm, $Q_{máx}$: 0.45 lpm.....	92
Figura 75. Desprendimiento a: $P_{mín}$: 500 psi, P_{int} : 1500 psi, $P_{máx}$: 2200 psi.....	93
Figura 76. Desprendimiento a: $Q_{mín}$: 0.15 lpm, Q_{int} : 0.30 lpm, $Q_{máx}$: 0.45 lpm.....	94
Figura 77. Desprendimiento a: $P_{mín}$: 500 psi, P_{int} : 1500 psi, $P_{máx}$: 2200 psi.....	96
Figura 78. Calibración de imagen de la burbuja en mm/pix.....	97
Figura 79. Comparación de velocidad experimental y teórica, del GRUPO I	101
Figura 80. Comparación de velocidad experimental y teórica, del GRUPO II	103
Figura 81. Comparación de velocidad experimental y teórica, del GRUPO III	106
Figura 82. Comparación de velocidad experimental y teórica, del GRUPO IV	108
Figura 83. Esfuerzos eléctricos en una burbuja.....	112
Figura 84. Comportamiento de los esfuerzos eléctricos y fuerza eléctrica a 9.0 kV ..	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Clasificación de reactores multifásicos.....</i>	6
Tabla 2	<i>Características de los contactores más utilizados.....</i>	7
Tabla 3	<i>Factores que gobiernan las condiciones finales del fluido</i>	23
Tabla 4	<i>Fuerzas de desplazamiento en diferentes posiciones de burbujas</i>	25
Tabla 5	<i>Influencia de un campo eléctrico en la formación de burbujas.....</i>	28
Tabla 6	<i>Configuraciones de la inyección de la burbuja</i>	31
Tabla 7	<i>Formas existentes de la generación de burbujas.....</i>	33
Tabla 8	<i>Propiedades químicas y físicas del agua</i>	39
Tabla 9	<i>Propiedades químicas y físicas del nitrógeno</i>	40
Tabla 10	<i>Principales configuraciones de electrodos para formar una burbuja.....</i>	41
Tabla 11	<i>Características de piezas del prototipo del reactor de burbujas.....</i>	42
Tabla 12	<i>Comparaciones de materiales del diseño del recipiente</i>	46
Tabla 13	<i>Características principales de la tubería capilar de cobre.....</i>	48
Tabla 14	<i>Desempeño de la tubería de cobre</i>	48
Tabla 15	<i>Parámetros de los recipientes de nitrógeno</i>	50
Tabla 16	<i>Selección de boquillas.....</i>	51
Tabla 17	<i>Características de un regulador</i>	53
Tabla 18	<i>Características de celdas eléctricas.....</i>	55
Tabla 19	<i>Parámetros de los electrodos.....</i>	55
Tabla 20	<i>Componentes para la fabricación del recipiente de ensayos</i>	59
Tabla 21	<i>Accesorios para la boquilla de cobre.....</i>	60
Tabla 22	<i>Accesorios del acople del drenaje del fluido liquido.....</i>	63
Tabla 23	<i>Características de componentes que producen un campo eléctrico</i>	64
Tabla 24	<i>Características de componentes de la base del reactor de burbujas.....</i>	67
Tabla 25	<i>Componentes de la estructura del prototipo del reactor de burbujas</i>	68
Tabla 26	<i>Utilización del campo eléctrico según su conexión eléctrica</i>	73
Tabla 27	<i>Equipo del sistema reactor de burbujas</i>	76
Tabla 28	<i>Equipos del sistema reactor de burbujas</i>	76

Tabla 29	<i>Acoples y lentes de la cámara aplicados al experimento</i>	78
Tabla 30	<i>Clasificación de grupos y ensayos experimentales</i>	84
Tabla 31	<i>Interpretación del grupo I cuando una burbuja se desprende</i>	92
Tabla 32	<i>Interpretación del grupo II cuando una burbuja se desprende</i>	93
Tabla 33	<i>Interpretación del grupo III cuando una burbuja se desprende</i>	95
Tabla 34	<i>Interpretación del grupo IV cuando una burbuja se desprende</i>	96
Tabla 35	<i>Número de Bond para el grupo I</i>	100
Tabla 36	<i>Grupo I: comparación de velocidad experimental y teórica por errores</i>	102
Tabla 37	<i>Número de Bond para el grupo II</i>	102
Tabla 38	<i>Grupo II: comparación de velocidad experimental y teórica por errores</i>	104
Tabla 39	<i>Número de Bond para el grupo III</i>	105
Tabla 40	<i>Grupo III: comparación de velocidad experimental y teórica por errores</i>	107
Tabla 41	<i>Número de Bond para el grupo IV</i>	107
Tabla 42	<i>Grupo IV: comparación de velocidad experimental y teórica por errores</i>	109
Tabla 43	<i>Fuerzas de equilibrio para las burbujas del grupo I con ϕ 0.3 mm</i>	110
Tabla 44	<i>Fuerzas de equilibrio para las burbujas del grupo II con: ϕ 0.3 mm</i>	110
Tabla 45	<i>Fuerzas de equilibrio para las burbujas del grupo III con: ϕ 0.5 mm</i>	111
Tabla 46	<i>Fuerzas de equilibrio para las burbujas del grupo IV con: ϕ 0.5 mm</i>	111
Tabla 47	<i>Tipos de esfuerzos del campo eléctrico de los grupos experimentales</i>	115
Tabla 48	<i>Clasificación de aspectos de la burbuja según su diámetro de boquilla</i>	116

RESUMEN

En este proyecto de investigación se plantea como objetivo desarrollar y construir un reactor de burbujas, para el cual se desea identificar los procesos existentes en las fases, en donde nos permiten predecir el comportamiento de los sistemas multifásicos y poder establecer un diseño. Para poder definir las características se procedió a utilizar la electrohidrodinámica donde este nos permite estudiar los fluidos que son sometidos a campos eléctricos, utilizando esta metodología es posible definir como es el comportamiento de un líquido y gas cuando estos reaccionan, para la cual se aplicó una carga variable de voltaje en un determinado lapso de tiempo donde nos permiten analizar las deformaciones que sufre la burbuja de nitrógeno cuando esta se encuentra de forma ascendente. En la realización experimental se procedió a utilizar dos boquillas tipo aguja de diferente diámetro, la cual nos permite analizar cómo actúan las burbujas ascendentes cuando se encuentran sometidos a una presión y caudal, mediante una cámara de alta resolución se puede observar como las burbujas se van deformando en las diferentes fases debido a la influencia de EHD. Una vez definido todos los parámetros, se trata de explicar mediante diagramas como el mecanismo que analiza las principales fuerzas ejercidas sobre las burbujas dinámicas varían dependiendo de la viscosidad del líquido con la que actué.

PALABRAS CLAVE

- REACTOR DE BURBUJAS
- ELECTROHIDRODINÁMICA
- MULTIFÁSICO
- CAMPO ELÉCTRICO
- BURBUJAS DINÁMICAS

ABSTRACT

In this investigation project to expound as objective develop and put up a bubble reactor for which as to identify the existing processes in the stage where it allows us predict the behaviour of the multifaceted systems and to decree a design. For to define the characteristics it proceeded to utilize electrohydrodynamics where this allows us to study the fluids that are submitted to electronic fields applying this methodology is possible determine how is the conduct from a liquid and a gas when these react for which as applied a load of voltage in a determined time lapse where it allows us analyze the deformations that suffer the nitrogen bubble when it is in ascending form. In the experimental realization proceeded to use two needle type nozzles of different diameter which allows us analyze how behave the ascending bubbles when they are subjected to a pressure and flow in a high-resolution camera we can observe how the bubbles deformed in the different phases due the influence of EHD. Once defined all the parameters, it is explained by diagrams as the mechanism that examines major forces exerted on the dynamic bubbles vary depending on the viscosity of the liquid with which I acted.

KEYWORDS

- **BUBBLE REACTOR**
- **ELECTROHYDRODYNAMICS**
- **MULTIPHASE**
- **ELECTRIC FIELD**
- **DYNAMIC BUBBLES**

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La utilización de los fluidos, según Ogata et al. (1985) en la actualidad en la industria química y petroquímica se realiza cada vez más para aumentar la productividad de los procedimientos, los cuales tienen una gran gama de aplicaciones en muchos componentes de la producción química, tales como en los procesos de absorción, reacciones de suspensión catalítica, biorreacciones, licuefacción del carbón, bebidas carbonatadas y entre otros.

Los reactores de columnas de burbujas son preferidos debido a la simplicidad de operación y a los bajos costos operativos, conforme Mashelkan (1970) y Shah et al. (1982) estos aplican una nueva técnica de dispersión de burbujas, donde igualmente Basu (1973) su método se basa en aplicar un campo eléctrico a un fluido dieléctrico. Los trabajos experimentales y teóricos sobre este tema son útiles para la optimización de procesos industriales terrestres y para aplicaciones de flujo bifásico en tecnología aeroespacial. El comportamiento de la burbuja en el espacio también es muy considerable para los sistemas de tecnología sin contenedores. Según Di Marco et al. (2003) la presencia de una zona eléctrica puede reemplazar la falta de flotabilidad.

1.2 Definición del problema

En la actualidad estos modelos de reactores de burbujas son muy utilizados en las diferentes áreas debido a que desempeñan un papel fundamental en la comprensión de fenómenos en la que implican el intercambio de masa térmica, donde suelen ser aplicados en los ámbitos industriales y naturales. Estos trabajos de investigación tanto

experimentales y teóricos sobre este tema son útiles para la optimización de los procesos industriales terrestres y también para el uso de flujo bifásico en tecnología aeroespacial. Estos efectos fueron ampliamente probados para las diversas aplicaciones en condiciones normales gravitacionales desde principios de los sesenta y hoy en día están aptas para ser utilizadas en el desarrollo industrial.

Entonces según Di Marco et al. (2003), cuando existe la presencia de un campo eléctrico, este puede reemplazar la falta de flotabilidad la cual es útil en esta zona como una herramienta de gestión de gas. En particular está bien establecido que la aplicación de un campo eléctrico externo mejora el rendimiento de ebullición y aumenta el flujo crítico de calor, también se debe tener en cuenta que dependiendo de la geometría del campo eléctrico se puede reducir el tamaño de las burbujas y alejarlas de la superficie.

La experimentación es un factor principal la cual ayuda, a definir qué tipo de configuración es la adecuada para los estudios en este caso se realizará el análisis cuando la trayectoria de la burbuja está en dirección ascendente el cual nos permite aclarar el efecto de la fuerza eléctrica sobre las burbujas, como también deshacerse de los efectos de los gradientes térmicos y la transferencia de masa entre las dos fases. Teniendo en consideración las mociones antes mencionadas, se desarrollará un prototipo experimental, en el cual nos permite investigar la evolución de las burbujas de nitrógeno en un recipiente en presencia de un campo eléctrico aplicado externamente, mediante esto el Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, podrá realizar distintas investigaciones en los diferentes campos de aplicación. El presente trabajo pretende realizar el estudio del comportamiento de la burbuja de nitrógeno cuando se utilizan dos diámetros diferentes en la generación de burbujas, teniendo en consideración los distintos parámetros técnicos que se usaran y por el cual se realizara la validación de resultados, de tal manera que esta investigación sirva de referencia para posteriores investigaciones.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar y construir un reactor de burbujas para el laboratorio de fluidos de la Universidad de las Fuerza Armadas – ESPE.

1.3.2 Objetivo específico

- Establecer el diseño de los componentes del equipo experimental para el estudio de un proceso que está sometido a la influencia de un campo eléctrico en un flujo multifásico.
- Definir los parámetros y variables requeridos para la realización de los ensayos.
- Implementar una metodología de operación del equipo experimental.
- Validar experimentalmente los resultados del campo eléctrico en un flujo multifásico.

1.4 Alcance del proyecto

El proyecto de investigación es de implementar un reactor de burbujas para el laboratorio de fluidos en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, donde se puede analizar la incidencia que tiene un campo eléctrico en un flujo multifásico, midiendo la velocidad y la morfología de la burbuja de nitrógeno. Así se procederá a realizar diagramas de comparación de la burbuja en dirección ascendente en diversos voltajes, referenciando si la burbuja está a una velocidad rápida o lenta, la cual es un factor considerable al momento de evaluar su comportamiento de la burbuja de nitrógeno.

1.5 Justificación e importancia

El presente proyecto tiene como objetivo principal, realizar un estudio al comportamiento de los fluidos cuando estos se encuentran sometidos a un campo eléctrico de carga eléctrica variable. Para desarrollar un análisis del comportamiento de la burbuja en dirección ascendente, se utilizará una cámara de alta velocidad la cual registrará las imágenes en una resolución de alta gama el cual nos permitirá analizar las formas de las burbujas. Entonces algunos modelos de la dinámica de burbujas para la validación de resultados pueden ser aplicados los propuestos por Pamperin & Rath (1995), u otros autores.

El principal fluido que se utilizara en esta investigación es el nitrógeno, este elemento se encuentra de forma abundante en nuestra atmósfera, de tal forma que este contiene propiedades estables y por esa razón no es propenso a intervenir en reacciones químicas. Pero este también es muy utilizado en las industrias por sus diferentes ventajas y cualidades en las diversas aplicaciones.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Reactores multifásicos

Los reactores multifásicos son aquellos que se encuentran presente dos o más fases para que se pueda efectuar una reacción en un proceso. La mayoría de los reactores existentes usan fases gaseosas y líquidas en contacto con un núcleo sólido. Pero según Fogler (2001) en algunos reactores la fase líquida es un medio inerte para que el gas entre en contacto con el catalizador sólido, lo cual permite proporcionar la distribución adecuada de flujo de calor o también el de crear superficies adecuadas de transferencia de materia.

En el diseño y proceso de los reactores multifásicos, existen muchas circunstancias relevantes que interaccionan las cuales son: la cinética, hidrodinámica, turbulencia, fenómenos de transporte y superficie. En estos sistemas multifásicos la presencia de múltiples fases hace que la velocidad de reacción dependa del contacto entre fases y de los factores característicos de las reacciones homogéneas.

Los principales factores más relevantes que gobiernan en la transferencia de calor y materia tienen una gran relevancia en la velocidad de reacción. Por lo tanto, condiciona y determina el tipo de reactor de operación adecuado para cada sistema. Pero se debe tomar en cuenta del progreso realizado en las décadas anteriores del entendimiento de cada una de las fases de los distintos reactores aún es incompleta y compleja, por el motivo el cual se recurre a la ayuda de programas de simulación complejos.

2.1.1 Clasificación de los reactores multifásicos

Estos reactores multifásicos se los puede clasificar dependiendo su sistema de funcionamiento y aplicación de fluidos en los diferentes procesos existentes en la actualidad. Donde estos cumplen ciertas condiciones básicas como son: el contacto eficiente entre gas y líquido, limitación de la caída de presión, fácil extracción de calor, bajo coste de construcción y mantenimiento.

A continuación, se clasificará varios tipos de equipos existentes para las reacciones entre gas y líquido. Levenspiel (2005) toma en consideración que esta clasificación se encuentra basada en diferentes características: los aspectos geométricos, las direcciones del flujo, la presencia o ausencia de catalizadores sólidos. Como se muestra en la *Tabla 1* se procederá a elaborar una descripción de cada tipo.

Tabla 1

Clasificación de reactores multifásicos

Lugar de reacción	Rellena	Columna Platos	Vacío	Tanque agitado	Otros
Fase fluida únicamente	Flujo en contracorriente "absorbedor"	Flujo en contracorriente e "absorbedor"	Flujo en contracorriente e "Torre pulverizada"; Paralelo o contracorriente e "Columna de burbuja"	"Absorbedor o Reactor"	Venturi, Mezcladores estáticos, Falling film
Catalizador Sólido	Contracorriente e paralelo descendente reactor "Trickle bed" "Reactor de relleno con burbujas" paralelo descendente		Paralelo o contracorriente e "reactor de burbujas"	Reactor "Slurry"	

Fuente: Conesa (2002)

2.1.2 Características de conectores

Hay que tener mucha importancia en algunas características de estos contactores de los reactores multifásicos, los cuales son de utilidad al momento que se va a realizar un diseño adecuado el cual se muestra en la *Tabla 2*.

Tabla 2

Características de los contactores más utilizados

Flujo	Contactador	a (m^2/m^3)	ε_L V1/V	Capacidad	Modelo utilizado	Características
Contra corriente	Torre de spray	60	0,05	baja	G y L en FP	Buena parte gases muy solubles
	Torre de relleno	100	0,08	alta	G y L en FP	Buena casi siempre, pero debe tener L/G=10
	Torre de platos	150	0,15	media alta	G y L en FP	
	Torre con burbujas con etapas	200	0,9	baja	G y L en FP	Necesita un mezclador mecánico o un mecanismo pulsante, Bueno para gases poco solubles y L/L
Paralelo	Mezclador estático	200	0,2-0,8	muy alta	G y L en FP	Muy flexible, $t_G=t_L$
Flujos mezclados de líquidos	Tanque de burbujas	20	0,98	media	G en FP / L en MC	Barato de construir
	Tanque agitado	200	0,9	media	G y L en MC	Barato, pero necesita un agitador mecánico

CONTINÚA 

FP: flujo pistón, MC: mezcla completa, a: superficie de interface/volumen del reactor, ϵ_L : fracción volumétrica de líquido.

Fuente: Levenspiel (2005)

2.2 Reactor de burbujas

Estos tipos de reactores son conocidos también como Slurry o de suspensión, a modo que permite formar un burbujeo en un reactivo gaseoso a través de un fluido con el cual puede reaccionar, debido a que el líquido contiene partículas y actúa a manera de catalizador disuelto, como se puede observar en la *Figura 1* la cual consta de sus partes principales a la vez.

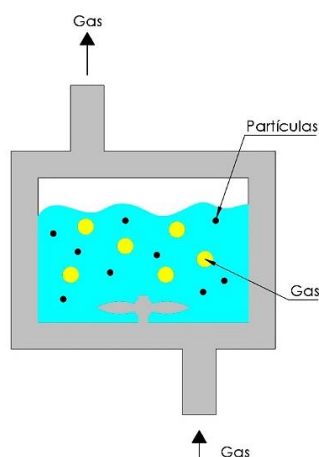


Figura 1. Esquema de un reactor Slurry

2.2.1 Principio de funcionamiento del reactor de burbujas

Este reactor funciona mediante los fluidos líquido y gaseoso, a los cuales se encuentran sometidos en un campo eléctrico el cual permite que hagan una reacción mutua cuando entran en contacto. Entonces su procedimiento se encuentra basado que se debe realizar la introducción de gas por la zona inferior del recipiente la cual provoca un flujo turbulento donde esta puede ser controlada mediante los parámetros de presión

y caudal, también hay que tener en cuenta que el fluido líquido puede estar en paralelo y contracorriente lo cual es una característica principal en su ámbito de experimentación.

En la *Figura 2*, se puede observar que estos reactores utilizan una mezcla la cual se realiza por burbujeo de gas y que requiere de menos energía que agitación mecánica.

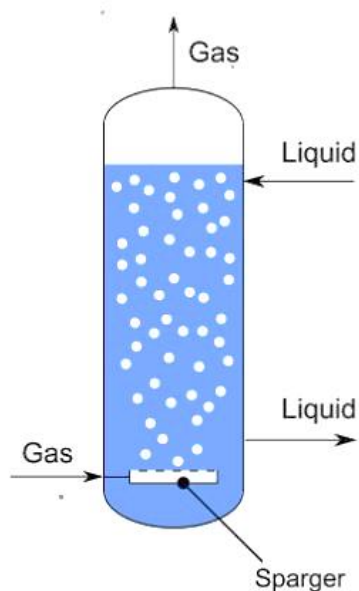


Figura 2. Esquema de interrelación entre los fluidos líquido y gas

Fuente: Lozano (2016)

En este modelo de reactor según Fogler (2001), el área superficial de la burbuja siempre dependerá del tiempo que paso en el reactor a esto se le denomina como periodo de residencia de burbuja, tomando en cuenta que estas burbujas se encuentran conformadas de diferentes tamaños.

2.2.2 Componentes básicos de un reactor de burbujas

Un reactor de burbujas principalmente se encuentra conformado por varios componentes e instrumentos de medición el mismo que constan de diversos materiales,

motivo por el cual este equipo de investigación hace que sea muy compacto, el modelo de este prototipo se muestra en la *Figura 3*.

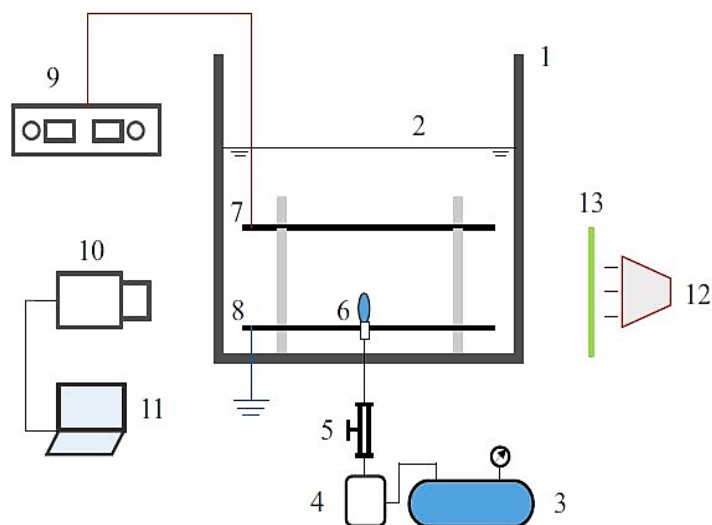


Figura 3. Esquema de componentes e instrumentos

Fuente: Wang et al. (2017)

Como se pudo observar en la *Figura 3*, los diferentes componentes que conforman este prototipo de reactor de burbujas, en la cual se procederá a describir a cada uno de ellos:

1. Recipiente de ensayo.
2. Líquido de ensayo.
3. Recipiente de almacenamiento.
4. Tanque tampón.
5. Caudalímetro con control de válvula.
6. Orificio de generación de burbujas.
7. Placa de electrodo de alto voltaje.
8. Placa de electrodo de tierra.
9. Generador de voltaje.
10. Cámara de alta velocidad.

11. Computadora portátil de adquisición de datos.
12. Fuente de luz led.
13. Difusor de luz PMMA.

2.2.3 Parámetros técnicos del reactor de burbujas

Los principales parámetros que se consideran importantes para el diseño de este prototipo son aquellos que pueden alterar el modelo de experimentación, estos pueden ser definidos como:

- Parámetros de la solución
- Parámetros del proceso
- Parámetros ambientales

Estos parámetros tienen diferentes características al momento de interactuar en conjunto e individualmente en las cuales existen propiedades físicas y mecánicas, en donde estas se aplicarán en el desarrollo de la investigación.

2.3 Parámetros de la solución

Estas propiedades son de gran importancia en la solución, las cuales realizan cambios en la interfaz de la burbuja cuando estas se generan en el transcurso del tiempo se aplica una carga variable de energía. En este proyecto se procederá a describir a las más importantes ya que están se irán desarrollando en esta sección.

2.3.1 Densidad

Esta es una propiedad física la cual permite medir la fluidez de un fluido, la magnitud se la puede expresar como la relación entre la masa y el volumen de la materia. Para conocer cuál es el comportamiento de las burbujas cuando interviene la densidad

de los flujos multifásicos, es necesario saber cómo interactúan estos entre sí mismos, entonces según Di Marco et al. (2003) menciona que existe una diferencia entre las densidades de los fluidos multifásicos de este proceso de investigación, como la densidad de la entrada a la cámara no es la misma densidad de la formación de la burbuja esto suele suceder por la caída de presiones que sucede a través de un orificio de boquilla.

También Webbon y Buyevich (1996) menciona que la variación de la relación de densidades se puede obtener cambiando la densidad de los fluidos, esto sucede cuando interviene la temperatura y la presión, ya que estos parámetros permiten ejecutar cambios bruscos a las propiedades de los fluidos. Mientras tanto que Ramakrishnan et al. (1969) dice que para poder disminuir la densidad del líquido y que no afecte al volumen de la burbuja es necesario que el fluido pase por el proceso de despresurización.

Se debe tener en cuenta que el fluido líquido a estudiarse en este procedimiento de investigación, no variara en casi mucho su valor de la densidad cuando actúa la temperatura y presión en conjunto para modificarlo, ya que el valor de este flujo es constante en la mayoría de su tiempo.

2.3.2 Conductividad eléctrica

Esta es una propiedad fundamental en esta investigación experimental en la formación de burbujas desde el diámetro de una boquilla, el cual tiene la capacidad de suministrar corriente eléctrica desde un material en donde le permite transportar electrones en la forma de electrolitos donde estos también son conocidos como conductores iónicos.

Cuando se necesita generar una corriente eléctrica para que esta propiedad física actúe es necesario aplicar una fuente externa u interna de energía, entonces una vez que se aplica esta energía conocida comúnmente como campo eléctrico según Ogata et al. (1985) aparecen fuerzas electrohidrodinámica en lugar de los esfuerzos ordinarios de la

agitación del mecanismo. Estos al momento de actuar en la superficie utilizan una técnica basada en la reducción del tamaño de las burbujas de gas en una apariencia no uniforme. Pero Di Bari y Robinson (2013) menciona que existen diferentes voltajes del campo eléctrico cuando el tiempo no dimensional transcurre en el cual interviene la presión hidrostática y la inducida eléctricamente en la forma de la burbuja.

También hay que tener en cuenta las propiedades eléctricas de los fluidos multifásicos utilizados, ya que estos permiten conducir con mayor facilidad la corriente. Allen y Karayiannis (1994) menciona que puede utilizarse los cambios de polaridad estos pueden ser positiva y negativa, sus efectos actuarían en el campo electrostático.

2.3.3 Tensión superficial

Según Gennes et al. (2004) el origen de la tensión superficial se encuentra en la sobrepresión existente en el interior de las burbujas y gotas. Motivo por el cual esta diferencia de presión tiene múltiples consecuencias, tal es el caso cuando existen gotas pequeñas están desaparecen, cuando existe una emulsión de las gotas más grandes este efecto sucede cuando al ser las primeras en salir se evaporan durante la fase de enfriamiento.

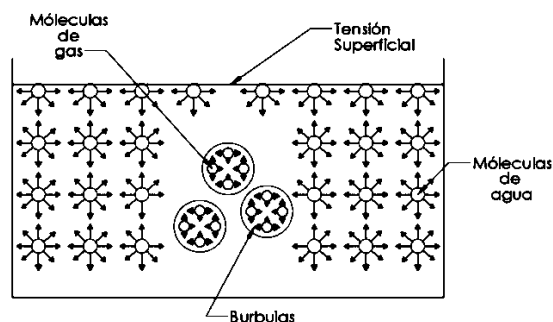


Figura 4. Fuerzas de cohesión y adhesión en la superficie de los fluidos

La tensión superficial se define como las fuerzas que producen la cohesión entre las moléculas de un líquido y son las responsables de la formación de este fenómeno

como se muestra en la *Figura 4*. Entonces según Shoikhedbrod (2017) los cambios de la tensión superficial en el borde de la sección del fluido-gas de la fase, como las aceleraciones de la gravedad conducen simultáneamente a un cambio de la forma de la burbuja de gas y su ángulo.

Los efectos de la tensión superficial en la burbuja según Wang et al. (2010) es primordial el comportamiento de la burbuja cuando este es muy pequeño o en el momento que la curvatura es muy grande entre las dos fases, estas provocan un problema de mayor influencia en la relación de la densidad del gas a la densidad del líquido la cual es muy pequeña, también se debe señalar que inicialmente la burbuja de forma esférica cuando su superficie aumenta esta resiste a las fuerzas de la tensión superficial.

- **La capilaridad en la tensión superficial**

Este estudia principalmente las interfaces existentes entre dos líquidos inmiscibles, motivo por el cual estas son deformables porque tienen la capacidad de cambiar su forma para minimizar su campo de energía superficial de manera libremente. Entonces según Henri Bouasse, nos describió de un aspecto adecuado el comportamiento de su monotonía del agua cuando este interactúa con el ambiente, cabe recalcar que la importancia de sus interfaces es de vital importancia en numerosos emprendimientos científicos y la industria.

2.3.5 Viscosidad

La viscosidad es la resistencia que tienen las moléculas de un fluido para poder separarse unas de otras y ser capaz de fluir, esta propiedad tiene la capacidad de originar cambios topológicos en las interfaces de la burbuja. En este atributo también hay que tener en cuenta el factor temperatura ya que este es de importancia cuando este aumenta, la viscosidad de un líquido disminuye mientras la viscosidad de un gas incrementa.

En esta época se realizaron varios trabajos experimentales para informarse acerca del efecto de la viscosidad en los líquidos, el cual hace cambios drásticos en la hidrodinámica y los regímenes de flujo prevaletientes de las columnas de burbujas, pero según Besagnia et al. (2017) cuando la viscosidad se encuentra en la fase líquida sus valores son diferentes, por lo cual pueden estabilizar o desestabilizar el régimen homogéneo del flujo lo cual este se interpreta como una consecuencia doble de la viscosidad sobre la transición del régimen de un flujo.

Wang et al. (2010) dice que los efectos de la viscosidad en el comportamiento de una burbuja de dirección ascendente, provoca que los números de Reynolds sean pequeños los cuales genera la disipación de la energía del flujo en una burbuja inicialmente esférica, pero también se sabe que si los números de Reynolds son suficientemente altos las burbujas se pueden dividir en varios subgrupos de burbujas.

2.4 Parámetros del proceso

Los principales parámetros del proceso de un reactor de burbujas son importantes, motivo por el cual al momento de aplicar estas variables en los parámetros de la solución estos tienden a variar de forma muy regular en la estructura de las burbujas de nitrógeno.

2.4.1 Voltaje

Según Chen et al. (2007) el efecto que genera el campo eléctrico permite analizar, el proceso del incremento de la burbuja mediante el cálculo de distribución del campo eléctrico en los alrededores del contorno de la burbuja y las tensiones eléctricas existentes en la superficie de la burbuja real cuando esta se desprende de la boquilla. Entonces a medida que aumenta el voltaje en el campo eléctrico en diferentes rangos, se puede observar, la deformación existente en la salida de las boquillas de las burbujas como se muestra en la *Figura 5*.

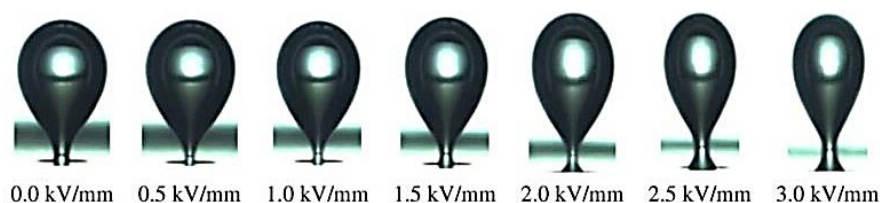


Figura 5. Formas de desprendimiento de burbujas a diversos voltajes

Fuente: Chen et al. (2007)

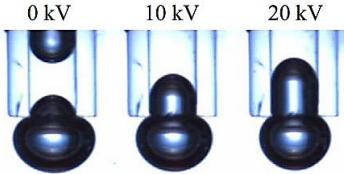
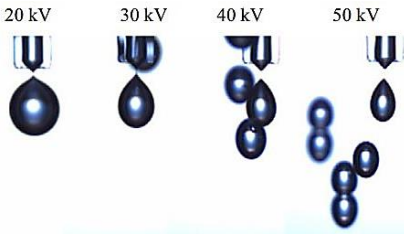
Wang et al. (2017) dice que a medida que se realizaba el incremento de voltaje en la cámara del reactor de burbujas, la salida de la burbuja fue aumentando significativamente esto fue posible por el flujo del caudal el cual dependen netamente de sus condiciones de experimentación. También se debe tener en cuenta que el estudio de las burbujas se puede producir cuando no se aplica un campo eléctrico.

2.4.2 Caudal

El caudal es la cantidad de un fluido que atraviesa una sección a una determinada velocidad a través de un ducto. Entonces Según Khurana y Kumar (1969) el caudal del gas produce ciertos efectos en los volúmenes de las burbujas, esto depende claramente del diámetro de las boquillas que la producen y del fluido multifásico, pero también se dice que el volumen de la burbuja aumenta a medida que la velocidad del flujo incrementa considerablemente.

Di Marco et al. (2003) menciona que cuando existe ausencia del campo eléctrico el desprendimiento de las burbujas no se produce a una baja velocidad de caudal, por lo contrario a mayor velocidad del flujo volumétrico de gas los efectos dinámicos producidos son suficientes para provocar la salida de las burbujas de los orificios, en la *Tabla 3*, mostrada a continuación se puede observar casos importantes.

Tabla 3*Influencia del caudal en un campo eléctrico*

Influencia del caudal en el campo eléctrico	
Características	Ilustración
Influencia del campo eléctrico en una burbuja unida al orificio.	
Producción de burbujas con un caudal constante.	

Fuente: Wang et al. (2017)

2.4.3 Presión

La presión es una propiedad física, la cual permite definir la magnitud de la proyección de una fuerza en la dirección perpendicular por una unidad de superficie. Pero según Efremov y Vakhrushev (1968) mencionan que la presión de la cámara de un reactor de burbujas se encuentra definida por las características de los flujos multifásicos, las más comunes a tratarse son la altura de la columna de líquido sobre una burbuja y el incremento de presión debido a la acción de las fuerzas de la tensión superficial. Se debe tomar en cuenta que la variable presión cambia de forma considerada cuando se encuentra dentro de la cámara continuamente desde un valor mínimo de presión durante la formación de burbujas, hasta un valor máximo de presión como se indica en la ecuación (1).

$$P_{m\acute{a}x} = Hg\rho_l + \frac{4\sigma}{d_{boq}} \quad (1)$$

En donde: H es la altura de la columna de líquido sobre el borde de la boquilla, mientras tanto que d_{boq} es el diámetro de la boquilla, g es la aceleración de la gravedad y ρ_l es la densidad del fluido líquido. También se debe tener en consideración en esta investigación que uno de los parámetros que intervienen en los efectos que suceden con las fuerzas de presión es el diámetro de la boquilla a utilizarse, según Gaddis y Vogelpohl (1985) dicen que a medida que el diámetro de la boquilla incrementa considerablemente las fuerzas de presión también tienden a aumentar.

Según Ogata et al. (1985) menciona que la presión eléctrica tiende a crecer al final de la formación de la burbuja de gas cuando esta es generada por una boquilla, mientras tanto la tasa de flujo de gas es reducida. Por lo que se observa que estos fenómenos dependen principalmente de las propiedades eléctricas de los líquidos.

2.4.4 Diámetro de la boquilla

Este parámetro es una pieza tubular la cual es adapta a un orificio y son empleadas para dirigir de forma uniforme la distribución y el tamaño de las burbujas, cada boquilla tiene diferentes cualidades según su área de aplicación. Terasaka y Tsuge (1993) menciona que para tener mayores coeficientes de transferencia de la masa volumétrica en una columna de burbujas es conveniente generar burbujas más pequeñas desde el distribuidor de gas. Entonces para la formación de burbujas a partir de un orificio de la boquilla, teniendo en cuenta que el flujo va a ser constante como se muestra en la *Figura 6*, se desarrolló este modelo con estas suposiciones:

- Caudal de gas constante.
- El líquido que rodea a la burbuja en reposo.
- Las formas de las burbujas son simétricas al eje.

- El movimiento de la burbuja no se ve afectada por las otras burbujas.

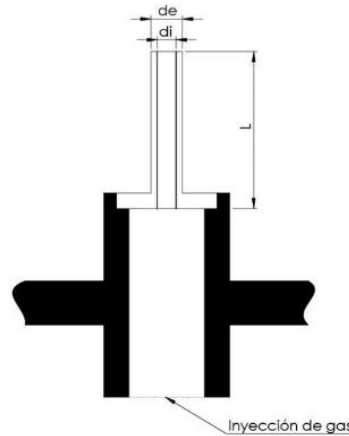


Figura 6. Sección de la tubería y boquilla

Fuente: Terasaka y Tsuge (1993)

Dónde: d_i es el diámetro interno de la boquilla, d_e es el diámetro externo de la boquilla y L es la longitud de la tubería, están son características que satisfacen la condición de flujo constante. Entonces Kumar y Kulor (1970) dice que la forma más sencilla de evaluar los volúmenes de las burbujas de boquillas individuales es aplicando el método indirecto, el cual consiste en saber su flujo volumétrico y frecuencia.

De acuerdo con Wraith (1971) cuando se inyecta un gas en un fluido líquido de gran extensión a través de un orificio sumergido de acción ascendente, este tiene la capacidad de formar una corriente de burbujas cuyas características netamente dependen de la tasa de inyección del gas, las propiedades de los fluidos multifásicos y de la geometría de la boquilla. Park et al. (1976) dice que al momento de aumentar el diámetro de la boquilla el volumen de la burbuja también aumenta proporcionalmente. Pero cuando se realiza la formación de las burbujas pequeñas en el interfaz de un orificio durante las primeras etapas de la burbuja el crecimiento aproximadamente en un segundo es esférica.

- **Tipos de diámetros de la boquilla**

En esta investigación para la generación de burbujas se realizará desde una superficie plana, en el cual se utilizarán dos tipos diferentes de boquillas una de un diámetro mayor y una de diámetro menor. Para realizar las respectivas comparaciones de su comportamiento cuando estas interactúan en un campo eléctrico y posteriormente para su validación de resultados.

a. Boquillas con diámetro menor.

Existe una gran variedad de diámetros pequeños de boquillas para la presente investigación, pero según Di Marco et al. (2013) este utilizo una boquilla de un diámetro de 0.3 mm como se indica en la *Figura 7*, por el cual se inyectó un gas y encima de este orificio se estaba generando un campo eléctrico el cual se empleó una cantidad especial de voltaje.

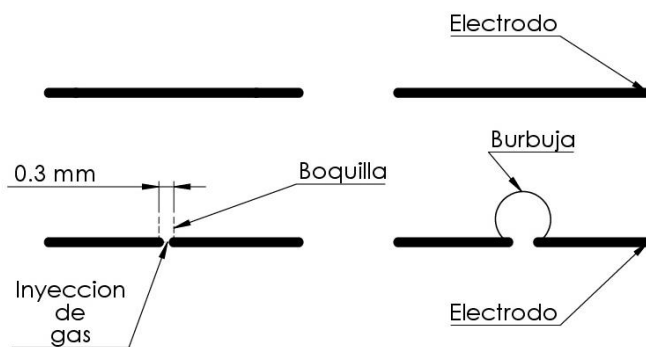


Figura 7. Esquema de aplicación con boquilla de diámetro menor

Los parámetros geométricos del contorno de la burbuja fueron concedidos usando una cámara de alta velocidad. También se pudo observar que las formas de las burbujas no tienen tanta deformación por el cual estos conservan el volumen de las burbujas, excepto cuando las fuerzas del campo eléctrico incrementan estas tienden a alargarse en las burbujas de diámetros más grandes. Di Marco (2003) menciona que al aumentar

el índice de flujo las burbujas se desprenden desde la boquilla una tras otra, pero también de una de estas burbujas se desprendieron nuevas burbujas pequeñas las cuales eran ligeramente diferentes en tamaño. La formación de nuevos grupos de burbujas diminutas suele suceder en el momento que se aplican altos rangos de voltaje el cual genera cambios en la frecuencia de desprendimiento y la velocidad de la gravedad.

b. Boquillas con diámetro mayor.

Para la aplicación de boquillas con diámetros mayores a 0.8 mm, Herman et al. (2002) realizó el estudio de la interfaz de las burbujas con una boquilla de 1.5 mm de diámetro como se muestra en la *Figura 8*, el cual nos proporciona datos importantes cuando se aplica un campo eléctrico. Entonces al momento de generar las burbujas que se forman en el orificio de la boquilla se puede definir su forma superficial gradualmente donde su contorno se va deformando cuando los parámetros del proceso varían en el tiempo, mientras tanto la nueva burbuja inyectada comienza a crecer en el orificio con nuevas características.

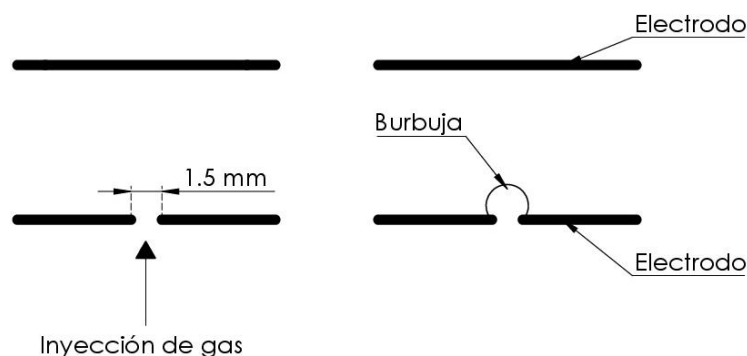


Figura 8. Esquema de aplicación con boquilla de diámetro mayor

En esta investigación para conocer el efecto del campo eléctrico aplicado sobre el comportamiento de una burbuja de gas inyectada, se tomaron en consideración las condiciones terrestres y de microgravedad, de tal manera que dio como resultado que cuando existe un entorno de microgravedad en ausencia del campo eléctrico existen

diferente conducta de las burbuja, en especial del gas este tiene inestabilidad en una interfaz líquida lo cual produce un crecimiento de burbujas esféricas sin desprendimiento con pequeñas oscilaciones.

2.5 Parámetros ambientales

Este tipo de área es muy importante, motivo por el cual podemos conocer la calidad de investigaciones que existe cuando se encuentran relacionados los parámetros ambientales y parámetros de la solución, en el presente proyecto este tipo de parámetro no alterara la experimentación razón por el cual se trabajara a una temperatura ambiente.

2.6 Modelos para dinámica de burbujas

En la actualidad existen varias investigaciones referentes a los modelos teóricos para la formación de una burbuja, el desprendimiento de la burbuja y la velocidad de subida de la burbuja. Pero solo pocos investigadores desarrollaron estudios sobre los fenómenos que generan en el burbujeo en un fluido líquido (agua) en un ambiente de microgravedad y también incluyendo el efecto del campo eléctrico.

También se sabe que en los reactores de burbujas se debe tomar en consideración los efectos que son producidos por factores sobre el volumen de la burbuja y la forma es generada claramente desde las boquillas sumergidas, los cuales afectaran a la dinámica de la burbuja. Tsuge et al. (1997) menciona que el comportamiento de la burbuja se ve fuertemente influenciado por la gravedad, entonces a medida que disminuye el nivel de la aceleración de gravedad todos los factores entran en equilibrio entre todas las fuerzas flotantes, inerciales, viscosas, la tensión superficial y el flujo del caudal del gas, pero según Pamperin y Rath (1995) dice que existe más problemas dinámicos en la generación de la columna de burbujas esto sucede cuando el aspecto de una burbuja de un volumen grande, se desprende una nueva burbuja con un diámetro menor dentro del líquido circundante, por lo cual el investigador menciona que se debe considerar estas

tres condiciones: el caudal debe ser constante, la presión constante y formación de burbujas en agujas sumergidas.

Herman et al. (2002) menciona que cuando se aplica una influencia de campo eléctrico bajo condiciones de la microgravedad y terrestres, se puede eliminar el efecto del enmascaramiento dominante de las fuerzas de flotación, también nos permite conocer el comportamiento de los mecanismos físicos implicados en la formación de burbujas y desprendimiento de burbujas.

2.6.1 Modelo de formación de las burbujas

Según Tsuge et al. (1997) menciona que se puede describir de forma teórica la formación de las burbujas desde una boquilla sumergida a un fluido líquido inerte en condiciones terrestres. Entonces en varias investigaciones se desarrollaron diferentes modelos para la fuerza de arrastre, para definir un modelo exacto se procedió a utilizar la fórmula generada por Clift et al. (1978) la cual tiene en consideración la geometría del sistema y el régimen del flujo multifásico.

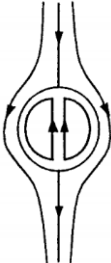
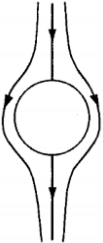
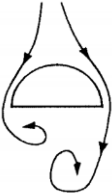
Debido a diferentes estudios sobre el comportamiento de las burbujas en los regímenes de velocidad, Di Marco et al. (2002) dice que a una burbuja aislada se la puede clasificar en tres formas, tal como se muestra en la *Tabla 3*, las cuales se encuentran relacionadas incondicionalmente con los números adimensionales: número de Reynolds y número de Bond.

Tabla 3

Factores que gobiernan las condiciones finales del fluido

Características		Formas	
Forma		Esférico	No esférico
Movimiento		Rectilíneo	Fluctuante
Pureza	Puro	Contaminado	Ambos

CONTINÚA 

Patrón de flujo			
Efectos gobernantes	Viscosidad	Viscosidad	Tensión superficial y gravedad
Números adimensionales	Re	Re	Bo
Rango	Número de Reynolds bajos	----	$0.25 < Bo < 40$

Fuente: Tomiyama et al. (1998)

2.6.2 Efectos de las fuerzas sobre las burbujas dinámicas

Es notable saber las interacciones que tiene la burbuja con un fluido con las diferentes fuerzas que actúan en el campo para que esta concurren a la deformación en su interfaz, entonces según Shew et al. (2006) se dice que es necesario conocer la fuerza de flotación que impulsa el incremento de la burbuja, mediante el cual da como resultado el aumento de la energía cinética del fluido circundante.

Según Wang et al. (2017) el mecanismo que hace el desprendimiento de la burbuja bajo la influencia de la electrohidrodinámica, hace posible realizar análisis primordiales de las fuerzas ejercidas sobre las burbujas dinámicas. Las principales fuerzas que generan la deformación de esta burbuja se las puede encontrar representadas como se muestra en la *Tabla 4*.

Tabla 4

Fuerzas de desplazamiento en diferentes posiciones de burbujas

Tipos de posición de la burbuja	
Características	Ilustración
Burbuja ascendente	
Burbuja descendente	
Burbuja lateral	

Fuente: Wang et al. (2017)

Todas estas fuerzas demostradas anteriormente son importantes para formar el estudio de cada una de estas componentes, en esta sección se procederá a describir el funcionamiento de cada una de ellas con su respectiva ecuación.

La fuerza de flotación, F_b , es aquella que actúa sobre las partes sobresalientes de la burbuja cuando esta se produce fuera del orificio, lo cual promueve que este flote hacia arriba y se describe como la ecuación (2).

$$F_b = (\rho_l - \rho_g)V_l g \quad (2)$$

En donde: V_l es el volumen completamente del líquido, g es la aceleración de la gravedad, ρ_l es la densidad del líquido y ρ_g es la densidad del gas. La fuerza capilar F_c , es la que tiende a mantener la burbuja unida a la superficie del orificio y su componente descendente, también este se encuentra relacionado con el ángulo como se indica en la ecuación (3).

$$F_c = 2\pi r_0 \sigma \sin\theta \quad (3)$$

En donde: r_0 es el radio inicial equivalente de la burbuja, σ es la tensión superficial y θ es el ángulo de la burbuja. La fuerza de presión interna F_{ip} , es aquella presión de inyección hacia arriba desde el interior del recipiente del gas, también podemos encontrar la fuerza de presión del líquido F_{lp} esta presión es ejercida en la parte de la punta de la burbuja cuando se encuentra sumergido en un líquido. Motivo por el cual estas fuerzas se las puede representar juntas en la ecuación (4).

$$F_{ip} - F_{lp} = (P_g - P_l)\pi r_0^2 \quad (4)$$

En donde: P_g es la presión interna del gas y P_l es la presión del líquido en la punta de la burbuja. También la fuerza eléctrica F_e , se muestra en la ecuación (5), entonces según Di Marco et al. (2013) esta fuerza actúa principalmente sobre la superficie de la burbuja y hacia el interior de la burbuja, esta tiene la capacidad de mostrar una magnitud mayor en los lados de la burbuja y no en la punta de la burbuja, lo cual permite que esta burbuja se contraerse y mostrar una forma alargada en la dirección del campo eléctrico.

2.6.3 Comportamiento de la burbuja en un campo eléctrico

Actualmente conocer el comportamiento de una burbuja cuando este interactúa en un área específica con un campo eléctrico es importante según Shaw et al. (2009), estos son de mucha utilidad para los campos de estudio tales como la electroquímica, física atmosférica entre otros, estos también nos permiten producir trabajos sobre las oscilaciones y la deformación de la forma de una caída cargada, la cual aún es conductora de un campo eléctrico.

Entonces según Spelt y Matar (2006) considera que la aplicación de un campo eléctrico, se consigue para utilizar mejoras en las condiciones de formación de una burbuja, suponiendo que este es homogéneo e inestable, lo cual produce que estas burbujas tengan pequeñas deformaciones, estos suelen existir de dos tipos diferentes los cuales se muestran a continuación:

- Influencia nula de un campo eléctrico
- Influencia de un campo eléctrico.
- **Tipos de interacciones con un campo eléctrico**

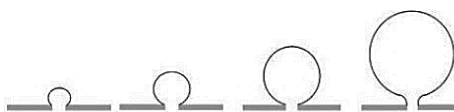
Los tipos de interacciones con un campo eléctrico son muy importantes en este proyecto de investigación los cuales nos permiten realizar la validación de resultados dependiendo su aplicación de energía, para el cual se describirá de forma básica cada uno de ellos tal como se indica en la *Tabla 5*.

Tabla 5

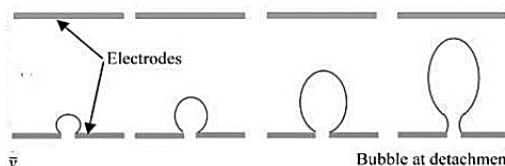
Influencia de un campo eléctrico en la formación de burbujas

Influencia del campo eléctrico en la burbuja	
Descripción	Ilustración

Campo eléctrico nulo: solamente se desea analizar como esta se deforma sin la aplicación de ninguna energía externa en el flujo, por ende, siempre la burbuja será esférica.



Campo eléctrico permanente: este campo eléctrico puede ser generado por dos formas las cuales son un campo positivo y un campo negativo, entonces el contorno de esta burbuja varía cuando la energía va subiendo.



Fuente: Herman et al. (2002)

Como cuando se menciona los dos posibles tipos de campos eléctricos que una fuerza externa de energía puede generar, se representa como se muestra en la *Figura 9* en este se interpretan como actúan las fuerzas en una burbuja ascendente.

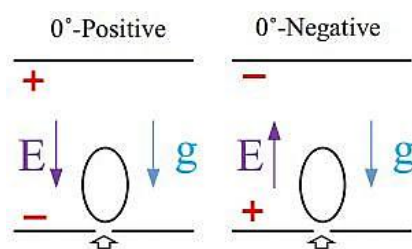


Figura 9. Campos eléctricos en una burbuja ascendente

Fuente: Wang et al. (2017)

En esta investigación, para la generación de burbujas desde un orificio se aplicó dos boquillas con diámetros diferentes, estos se utilizarán bajo la influencia de un campo eléctrico el cual permitirá distinguir la forma de la burbuja en el transcurso del tiempo cuando interactúe en dos tipos distintos de fluidos multifásicos.

2.6.4 Efecto del campo eléctrico de la burbuja en diferentes direcciones

En el comportamiento de la interfaz de una burbuja inyectada en diferentes direcciones, se debe realizar una investigación experimental sistemática acerca de los efectos que produce la electrohidrodinámica en las superficies todo esto cuando se aplica un campo eléctrico CC uniforme en todos los ensayos posibles a realizarse en la generación de burbujas con boquillas de distintos diámetros.

El proceso para aplicar un campo eléctrico uniforme en la zona de generación de burbujas a un fluido dieléctrico, es para mejorar la transferencia de calor que existe entre estos según Wang et al. (2017), para demostrar la influencia de un campo eléctrico en el comportamiento de una burbuja se realizan estudios, donde nos permiten conocer la fuerza eléctrica que está siendo experimentada en un fluido dieléctrico la cual se muestra en la ecuación (5),

$$F_e = qE - \frac{1}{2}E^2\nabla\varepsilon + \frac{1}{2}\nabla[E^2\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho_m}\right)\rho_m \quad (5)$$

En donde: q es la densidad de la carga eléctrica, ρ_m es la densidad de la masa de fluido, E es la energía del campo eléctrico y ε es la permitividad dieléctrica del fluido. Entonces también se describirá a cada uno de estos términos de la ecuación (5) donde según Chen et al. (2007), el primer término del lado derecho representa la tensión electroforética esta es generada por la carga neta libre dentro de un fluido y puede ser ignorado cuando q es bajo, el segundo término es la tensión dielectroforético, T_{DEP} , este

es el resultante de la distribución uniforme dieléctrica en el campo eléctrico, el tercer término es la tensión electrostrictiva, T_{STR} , causado por el voltaje del campo eléctrico no homogénea y la variación de la permitividad eléctrica, donde ϵ_0 es la permitividad al vacío después que se aplicó la ley de Clausius-Mossotti para simplificar.

También se deben considerar las direcciones que tiene cada una de las burbujas en forma de vectores la cuales suelen ser expresadas como n_l, n_g, t_l, t_g estos indican el comportamiento de su trayectoria, donde los subíndices muestran el tipo de fluido multifásico a tratarse ya sea líquido o gas respectivamente lo cuales se representan en la *Figura 10*.

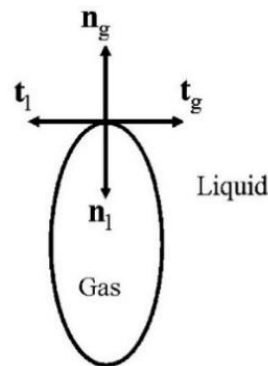


Figura 10. Esquema de la interfaz de la burbuja líquido-gas

Fuente: Chen et al. (2007)

Una vez definida todas las características eléctricas que definen a la formación y deformación del interfaz una burbuja, es conveniente saber qué casos de direcciones de inyección de burbujas son habitualmente investigados.




- **Casos de inyección de burbujas.**

En la actualidad existen varios casos de la dirección de inyección de las burbujas en los flujos multifásicos los mismos que se muestran en la *Tabla 6*, estas son investigadas para saber el crecimiento del interfaz con la ayuda de una cinematografía

de alta velocidad, donde permiten estudiar el comportamiento de su interfaz cuando interactúan el voltaje y caudal.

Tabla 6

Configuraciones de la inyección de la burbuja

Configuraciones de inyección de la burbuja	
Descripción	Ilustración
<p>Burbuja ascendente: se genera cuando está a un ángulo de 0°, estos son muy utilizados en las investigaciones con diferentes tipos de fluidos.</p>	
<p>Burbuja descendente: esta burbuja se produce de forma descendente, entonces esta se encuentra colocada a un ángulo de 180°</p>	
<p>Burbuja lateral: la generación de este modelo de burbujas lateral esta debe posicionarse a un ángulo de 90°</p>	

Fuente: Wang et al. (2017)

2.6.5 Comportamientos de la burbuja en un flujo

En esta sección se desarrollará el estudio del proceder de una burbuja cuando esta se genera en un fluido, el cual tiende a deformarse de acuerdo cambien los parámetros del proceso y solución. En la actualidad existen varias investigaciones acerca del comportamiento de una burbuja cuando esta entra en contacto en fluido newtoniano, pero según Clift et al. (1978) y Michaelides (2006) estos contienen un compendio completo, donde analizan de forma contundente cada tipo de fenómeno que existe en los flujos multifásicos.

Entonces se puede decir que cuando se tiene dos fluidos inmiscibles estos generan una interfaz con una pequeña sección, motivo por el cual estos forman una resultante en el cual los sistemas tienden a buscar un estado de equilibrio con una mínima cantidad de energía. En el momento que ocurre este fenómeno es muy posible que cuando se tiene una diminuta porción de un fluido inmiscible en otro, la apariencia que obtendrá la burbuja es de forma esférica, esto suele acontecer cuando la tensión interfacial es la fuerza dominante. También se puede decir que en el tiempo que intervienen otros tipos de fuerzas la burbuja puede tomar diferente aspecto, esto suele suceder cuando las fuerzas inerciales son las dominantes.

2.6.6 Burbujas en fluidos newtonianos

Cuando se desea realizar un estudio del comportamiento de las burbujas en un fluido newtoniano, siempre es necesario saber en qué modelo o tipo se producirá el análisis del mismo, las principales formas existentes son las indicadas.

- Burbuja aislada.
- Par de burbujas.

En esta investigación, se procederá a utilizar el tipo de burbuja aislada este modelo sirve para analizar todas las características existentes en una burbuja cuando este tiene cambios radicales a partir de su generación y formación.

- **Burbuja aislada**

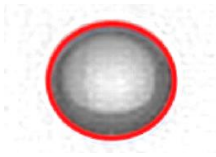
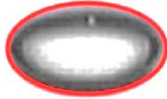
La burbuja aislada suele conformarse cuando este es sometido a un flujo externo, para que se produzca la deformación debe ser necesario que lleguen al equilibrio de la interfaz los esfuerzos normales y cortantes. Entonces las formas que obtienen estas son limitadas para el cual existen algunos estudios acerca de la apariencia de la burbuja.

- **Formas de burbujas**

Para poder clasificar las formas de las burbujas, es necesario saber que no solo depende de la velocidad de ascenso sino también de la generación de voltaje aplicado, de tal manera que el comportamiento de coalescencia, entonces en esta sección que se mostrará en la *Tabla 7*, se describirá a cada uno de los tipos existentes.

Tabla 7

Formas existentes de la generación de burbujas

Elementos del conjunto de lentes de la cámara	
Descripción	Ilustración
<p>Burbuja esférica: según Ngachin (2011) esto suele suceder solo si la tensión interfacial y fuerzas viscosas son las más importantes que las fuerzas de inercia.</p>	
<p>Burbujas elipsoidales: todas son similares por lo cual sufren pequeñas deformaciones periódicas en la cual complica su caracterización.</p>	

CONTINÚA →

Burbuja tipo casquete esférico: Estas burbujas adoptan una forma plana la cual tiene una base cóncava, estas son mejor descritas como una burbuja elipsoidal cortada, estos existen de formas diferentes.



Fuente: Kang et al. (2017) y Sámano (2011)

2.7 Campo eléctrico

Es un campo físico el cual se encuentra representado mediante un modelo, por el cual se genera interacciones entre sistemas y cuerpos que contienen propiedades de naturaleza eléctrica como se muestra en la *Figura 11*. Pero según Bitter (1964) las fuerzas de un campo eléctrico actúan a través del vacío donde se encuentran estas cargas, pero también se lo puede deducir como la cantidad de energía y movimiento e incluso de masa que pueden transmitirse a través del vacío de una partícula a otra distante.

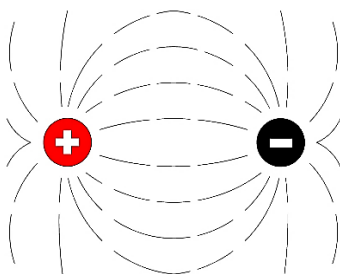


Figura 11. Generación de campo eléctrico

Para generar este campo eléctrico en un determinado espacio es necesario que este se encuentre comprendido entre electrodos con cargas positiva, como de negativa los cuales ejercerán una reacción en una zona arbitraria.

2.7.1 Flujo eléctrico

A el flujo eléctrico se lo puede determinar a través de una superficie, motivo por el cual también es denominado como un campo eléctrico que es multiplicado por un área de una superficie proyectada sobre un plano perpendicular al campo como se muestra en la *Figura 12*.

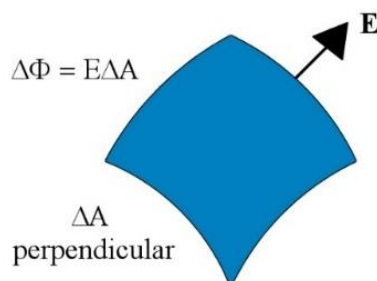


Figura 12. Flujo eléctrico en área perpendicular

Para poder evaluar la cantidad de carga encerrada que existe en una superficie definida, es de gran importancia aplicar la ley de Gauss ya que esta es una herramienta adecuada para obtener resultados de su comportamiento y evolución.

2.7.2 Celdas eléctricas

Estas celdas eléctricas son aquellas capaces de generar un tipo de energía que sea posible utilizarse en otro prototipo de procesos, por lo cual actualmente según Wilches et al. (2014) esta celda se encuentra conformadas por unos conductores los cuales son llamados electrodos y los mismos se encuentran sumergido en un fluido para formar una reacción.

2.7.3 Tipos de celdas eléctricas

Estas celdas eléctricas o electroquímicas se clasifican en dos grandes tipos fundamentales de familias, esto varían dependiendo de su tipo de funcionalidad donde son capaces de generar su propio modelo de energía, las cuales son:

- Celda galvánica
- Celda electrolítica

Entonces cada una de estos dos tipos de celdas electroquímicas se describirá en la siguiente sección dando a conocer su principio de funcionamiento como también sus principales características.

- **Celda galvánica**

Esta celda electroquímica también es conocida como pila por sus similitudes características, pero según Clavijo (2002) este tipo de celda produce una reacción química espontánea por lo cual igualmente genera electricidad y esta puede ser convertida en trabajo útil para establecer el funcionamiento de otro sistema, esta se muestra en la *Figura 13*, la cual tiene cierta particularidad.

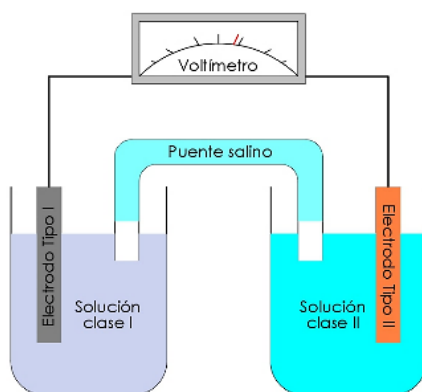


Figura 13. Esquema de la celda galvánica

- **Celda electrolítica**

Este es un dispositivo utilizado para realizar la descomposición química mediante una corriente eléctrica de fluidos ionizados denominada como electrolitos la cual se muestra en la *Figura 14*. Pero según Clavijo (2002) es una celda electroquímica no espontánea, la cual para que exista una reacción es necesario aplicar un diferencial de potencial eléctrico desde el exterior del sistema.

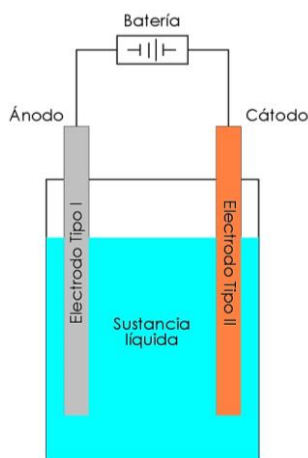


Figura 14. Esquema de la celda electrolítica

En este tipo de celda electroquímica, los electrodos son parte fundamental porque son donde ocurren la semirreacción de oxidación la cual le corresponde al ánodo mientras que en el otro electrodo ocurre la semirreacción de reducción que pertenece al cátodo.

2.8 Flujo multifásico

El flujo multifásico es el movimiento concurrente que existe del gas libre y líquidos en ciertas áreas, lo cual hace que este flujo se pueda desplazar en diferentes trayectorias, por el cual entonces los fluidos al encontrarse pueden formar una mezcla homogénea.

2.8.1 Fluido multifásico

Este generalmente es un fluido, pero según Schlumberger (2017) esto se encuentra comprendida por varias fases, tal como son líquidos a base de agua o algún otro fluido. El fluido multifásico tiene gran importancia en dos áreas fundamentales como los son el flujo de fluidos multifásicos y la separación de las diferentes fases en la superficie.

- **Flujo de burbujas**

El flujo de burbujas se crea según Schlumberger (2017) mediante un régimen de flujo de fluido multifásico el cual se caracteriza por la distribución de una fase gaseosa, como burbujas a través de una fase líquida esta se muestra en la *Figura 15*. Este proceso se produce cuando las burbujas, se congregan y hacen una combinación para crear una asignación menos uniforme de la fase gaseosa, por lo cual crea un cierto deslizamiento relativo entre las fases por ende el gas tiende a atravesar la fase líquida.

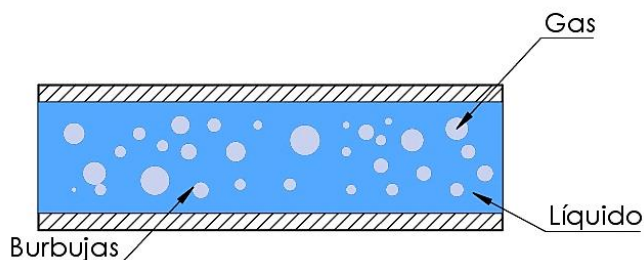


Figura 15. Comportamiento del flujo de burbujas en un líquido

2.8.2 El fluido

El fluido se deforma continuamente y también carece de forma propia mediante el cual este adopta la apariencia del recipiente que lo contiene. Pero según Mott (2006) los fluidos se encuentran sujetos a grandes variaciones de presión el cual no tiene las

propiedades necesarias para resistir las fuerzas o esfuerzos de corte si perder su capacidad de fluir.

En esta investigación se aplicará dos tipos diferentes de fluidos los cuales son el nitrógeno y el agua, con estos se realizará varios estudios acerca de su comportamiento cuando este llega a combinarse y forman una reacción, en la formación de burbujas.

- **El agua**

El agua tiene una enorme presencia en la tierra lo cual su capacidad es del 71% en su forma global, esta se localiza en el medio ambiente en tres estados diferentes de la materia como son en aspecto líquidos, sólidos y gaseosos. El agua es un fluido de trabajo que se encuentra conformada a partir de la unión de enlaces covalentes, por dos átomos de hidrogeno y una de oxígeno, por lo cual su fórmula molecular se establece como H_2O y se trata de una molécula muy estable, las principales propiedades se pueden observar en la *Tabla 8*.

Tabla 8

Propiedades químicas y físicas del agua

Propiedades	Parámetros	
Temperatura (T)	20	$^{\circ}C$
Densidad (ρ)	998	kg/m^3
Viscosidad cinética (μ)	1×10^{-6}	m^2/s
Viscosidad dinámica (ν)	1×10^{-3}	Ns/m^2
Tensión superficial (σ)	$72,8 \times 10^{-3}$	N/m
Peso específico (P_e)	9,789	kN/m^3
Calor específico (C_e)	4,182	$kJ/K \text{ kg}$
Conductividad térmica (λ)	0,6	$W/m \text{ }^{\circ}C$
Conductividad eléctrica	0,04	$\mu S/cm$

Fuente: Studocu (2017)

Para poder establecer las características principales y respectivos valores del fluido de trabajo, se consideró como parámetro primordial la temperatura la cual es de 20

°C, también se debe tener en cuenta que la importancia de estas propiedades varía dependiendo de la temperatura a la cual se encuentra sometida.

- **El nitrógeno**

El nitrógeno es un gas diatómico e igualmente es el elemento más abundante que existe en la atmosfera en una proporción del 80% la cual también se lo puede encontrar en la zona de la biosfera y en los seres vivos se los encuentra en las proteínas motivo por el cual es de vital importancia para el ser humano. En la actualidad este fluido de trabajo tiene varias aplicaciones en los diferentes campos de la ingeniería, este suele ser adoptado como refrigerante en su estado líquido, mientras que en su forma de gas es aplicado en las industrias de la manufactura e investigaciones, por eso es posible conocer las principales propiedades físicas y químicas del nitrógeno las cuales se muestra en la *Tabla 9*, estos parámetros varían de acuerdo con el cambio que existe en la temperatura.

Tabla 9

Propiedades químicas y físicas del nitrógeno

Propiedades	Parámetros	
Temperatura (T)	0	°C
Densidad (ρ)	1,25	kg/m ³
Viscosidad (μ)	0,18	nNs/m ²
Calor específico (C_e)	1040	J/K kg
Conductividad térmica (λ)	0,02598	W/m °C
Conductividad eléctrica	10 ⁶	S/m

Fuente: Ehu (2017)

- **Análisis y selección de configuraciones alternativas para una burbuja**

Una vez definido los modelos existentes de los reactores de burbujas, se realizara un análisis, para seleccionar un modelo que cumpla con las perspectivas de la investigación de tal manera que en la *Tabla 10*, se presentara una clasificación según la

configuración, para ello se evaluara en una escala de 1 el más bajo como ineficiente y 5 el más alto como eficiente.

Tabla 10

Principales configuraciones de electrodos para formar una burbuja

Características de una burbuja									
Configuración	Tipo			Parámetro de diseño			Variables experimentales		
	Reactor	Campo eléctrico	Forma de burbuja	Voltaje (corriente)	Caudal y Presión	Diámetro de boquilla	Velocidad	Fuerzas de equilibrio	Esfuerzos eléctricos
Electrodos paralelos en dirección vertical	Slurry	Uniforme	Se alarga en dirección horizontal	5	3	5	4	3	3
Electrodo tipo: placa lateral a punto	Slurry	No uniforme	Se deforma irregularmente	2	3	5	3	3	3
Electrodos paralelos en dirección horizontal	Slurry	Uniforme	Se alargan en dirección vertical	5	4	5	4	5	4

Al generar una evaluación con respecto a los parámetros de diseño y variables experimentales, las mismas que están descritas en el anexo C, la configuración más óptima para realizar el estudio sobre el comportamiento de una burbuja ascendente es la que contiene un campo uniforme de corriente y permite definir el contorno de la burbuja cuando se alarga en dirección vertical.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIALES

En el presente capítulo se desarrollan la selección de materiales y dimensionamiento adecuados para la estructura del diseño de prototipo del reactor de burbujas, la cual se encuentra conformada por elementos mecánicos, hidráulicos y eléctricos.


- **Selección de materiales para los componentes del reactor**

Se clasificará cada pieza del reactor de burbujas según el sistema en el que intervenga, tal como se muestra en la *Tabla 11*.

Tabla 11

Características de piezas del prototipo del reactor de burbujas

Sistema	No. De Pieza	Denominación	Material	Observación
DISEÑO MECÁNICO	1	Base del reactor de burbujas	Aluminio-Caucho	Unión de partes con PegaTanK
	1	Placa base del reactor	Acero inoxidable	Pintado de color blanco
	5	Recipiente de ensayos	Vidrio templado	Unión de láminas con silicona
	1	Tubería de desagüe de 3/8	Cobre	Tubería doblada
	1	Tubería para gas de 1/4	Cobre	Tubería doblada
	1	Recipiente de gas de 2m ³	Nitrógeno	Color amarillo
	2	Boquillas	Cobre	Distintas por diámetro

CONTINÚA 

DISEÑO HIDRAULICO	2	Acople plástico macho	Teflón	Planos de diseño en anexo A
	1	Acople plástico hembra	Teflón	Planos de diseño en anexo A
	1	Regulador de flujo-presión	Varios	
DISEÑO ELECTRICO	1	Electrodo tipo I	Cobre	Planos de diseño en anexo A
	2	Electrodo tipo II	Cobre	Planos de diseño en anexo A
	1	Soporte mecanismo electrodo	Baquelita	Pintado de color blanco, planos de construcción en anexo A
	1	Tornillo posicionador	Teflón-Nylon	Planos de diseño en anexo A, adjunto cada componente

Se describió los principales elementos o piezas que conforman el reactor de burbujas, la mayoría de la selección de materiales fue escogida por comparación.

3.1 Diseño mecánico

Para definir el diseño mecánico de este prototipo se tomó en consideración un análisis ya que estos deben cumplir un objetivo, el cual cumplen un proceso de decisiones como suelen ser su dimensionamiento, calidad del material, tecnología de fabricación y funcionamiento, en cada uno de los componentes mecánicos.

3.1.1 Base del reactor de burbujas

La principal característica de la base del reactor de burbujas es que estará constantemente en contacto con el agua, los materiales más adecuados para su construcción es el aluminio y el acero inoxidable, ya que estas son resistentes a la corrosión como se indica en la *Figura 16*.

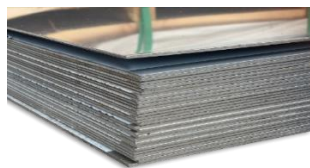


Figura 16. Láminas de acero inoxidable

Fuente: Proacero (2017)

El diseño estructural de la base del reactor de burbujas es un modelo simple como se muestra en la *Figura 17*, el cual se prefabricará de un material ligero en este caso el aluminio, ya que tiene la propiedad alta de ser corroído cuando entra en contacto con un fluido.

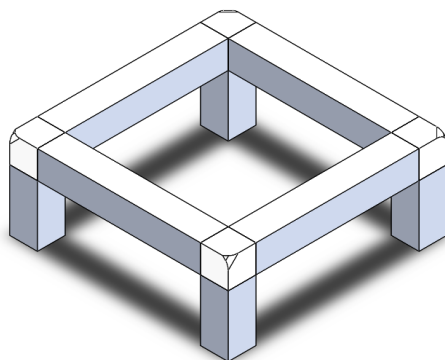


Figura 17. Estructura de la base del reactor de burbujas en aluminio

Esta base contiene una lámina de soporte con características particulares en el cual existen conexiones a los sistemas, por donde ingresan y salen los fluidos entre el recipiente acrílico, los cuales se encuentran perforados de forma diagonal como se muestra en la *Figura 18*.

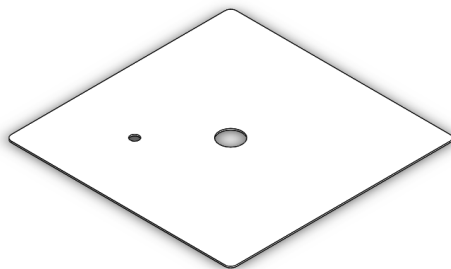


Figura 18. Isometría de la lámina de acero galvanizado con perforaciones

Igualmente, esta base de tipo soporte del recipiente de ensayos tendrá a sus extremos una perforación para que cada sistema de fluidos salga en dirección contraria como se muestra en la *Figura 19*.

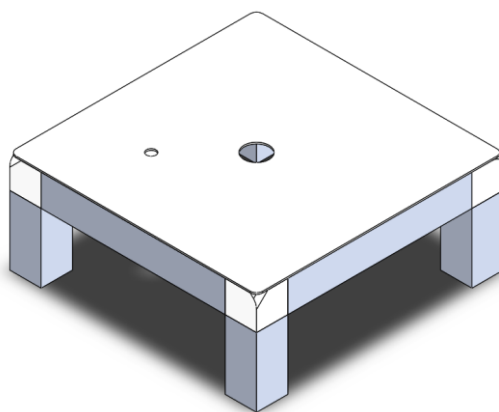


Figura 19. Isometría en conjunto de la base del reactor y placa soporte

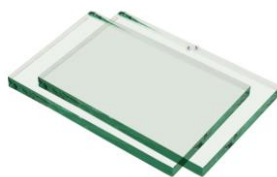
3.1.2 Recipiente de ensayos

En la selección del material adecuado para el diseño del recipiente en el que se realizara los ensayos experimentales, se procedió a escoger uno que cumpla la principal característica la cual es que ofrezca mayor visibilidad, pero también a la misma vez el factor de conductividad térmica sea más resistente a continuación en la *Tabla 12*, se procederá a crear varias comparaciones entre los más renombrados materiales.

Tabla 12*Comparaciones de materiales del diseño del recipiente*

Material	Características	
	Vidrio	Metacrilato
Resistencia al impacto	Bajo	Alto
Transparencia	Bajo	Alto
Dureza	Alto	Bajo
Mecanización	Alto	Alto
Peso	Pesado	Ligero
Conductividad térmica	Alto	Bajo

Entonces el diseño del recipiente se realizará con el vidrio, el cual tiene una característica en particular que tiene mayor eficiencia con la conductividad térmica, en la *Figura 20* se indica el material que se aplicara en la construcción.

**Figura 20.** Vidrio templado

Fuente: SZG (2017)

Una vez seleccionado el material a utilizarse para realizar el diseño del recipiente, se procede a definir la forma geométrica la cual es como se muestra en la *Figura 21*, esta contiene perforaciones por donde se harán conexiones con los sistemas hidráulicos.

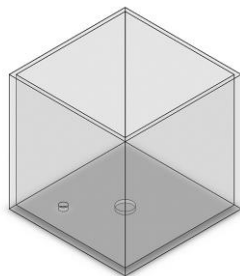


Figura 21. Isometría del recipiente de ensayos en acrílico

3.1.3 Tuberías de cobre

Para la selección de esta tubería, se tomó en cuentas varias circunstancias a la cual va estar sometida como son ductilidad, maleabilidad y corrosión, estos son importantes al momento de diseñarlos como se muestra en la *Figura 22*.



Figura 22. Tubería capilar de Cobre

Fuente: FMS (2017)

Entonces se procedió a utilizar una tubería de cobre, la cual cumple las características necesarias como se lo indica en la *Tabla 13*, donde se conocerán las principales cualidades.

Tabla 13*Características principales de la tubería capilar de cobre*

Parámetros	Características
SOLDABILIDAD	Facilita el proceso de soldado por su alto contenido de fosforo
RESISTENCIA	Es muy útil y duradero, opone resistencia a la oxidación
SEGURIDAD	Soporta la congelación de tuberías en las instalaciones

Para el diseño de esta tubería se procedió a utilizar dimensiones comerciales existentes en el mercado, para la selección de tuberías se seleccionó según la función que desempeñe en este proyecto los cuales se muestran en la *Tabla 14* y en la *Figura 23* se puede observar los principales parámetros de dimensionamientos.

Tabla 14*Desempeño de la tubería de cobre*

Descripción	A (in)	B (in)	Espesor (in)
Tubería para desagüe	3/8	1/4	1/16
Tubería para gas	1/4	1/8	1/16

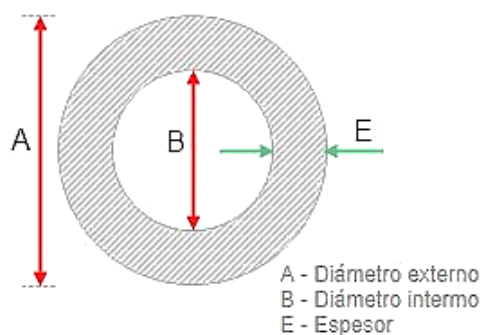


Figura 23. Dimensionamiento de la sección de la tubería

Fuente: FMS (2017)

3.1.4 Recipiente de gas

Al seleccionar un recipiente de gas, se procedió a escoger desde una gran variedad existente y dependiendo su aplicación, la cual debe cumplir varias características y parámetros importantes al momento de elegir un cilindro de gas como se indica en la *Figura 24*.



Figura 24. Tipos de recipientes

Fuente: Linde (2017)

La selección del recipiente del gas de nitrógeno, se tomó uno que tenga todas las condiciones para realizar la experimentación, en la *Tabla 15* se muestra sus diferentes parámetros.

Tabla 15

Parámetros de los recipientes de nitrógeno

Gas	Datos Técnicos				
	Capacidad (l)	Presión (bar)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Contenido (m ³)
Nitrógeno	20	300	320	662	5,2
Nitrógeno	10	300	320	570	2,6
Nitrógeno	10	200	320	570	2

Fuente: Linde (2017)

Entonces una vez definido las características del recipiente, se procedió a utilizar uno cuyo contenido es de 2m³, el cual es el indicado para estos tipos de investigaciones con gases como se puede indicar en la *Figura 25*.



Figura 25. Recipiente de Nitrógeno de 2m³

3.2 Diseño hidráulico

En esta área de diseño se formalizo una selección adecuado de varios componentes que permiten que el diseño del prototipo sea más eficiente al momento de trabajar en conjunto con la parte de diseño mecánico y eléctrico, motivo por lo cual hace que cumplan los principales objetivos planteados para un funcionamiento.

3.2.1 Boquillas

En la selección del modelo adecuado de las boquillas para generar las burbujas de diferentes diámetros, estas existen una gran variedad de tipos, formas geométricas, funcionamiento y en distintos materiales como se indica en la *Figura 26*.



Figura 26. Tipos de Boquillas

Fuente: Tridimake (2017)

Entonces para los ensayos de experimentación se procederá a definir a dos tipos de boquillas, la cual la única diferencia es que su diámetro es diferente, como también el material del que está construido, estas cualidades se muestran en la *Tabla 16*, estos nos permitirán estudiar como es el comportamiento de una burbuja cuando este se conforma en un medio.

Tabla 16

Selección de boquillas

Clase boquilla	Características	
	Diámetro (mm)	Tipo Material
Boquilla I	0,3	Cobre
Boquilla II	0.5	Cobre

Las boquillas de cobre con sus respectivas características definidos anteriormente serán las aplicadas durante los ensayos de experimentación, las cuales se pueden indicar a cada una de ellas en la *Figura 27*.

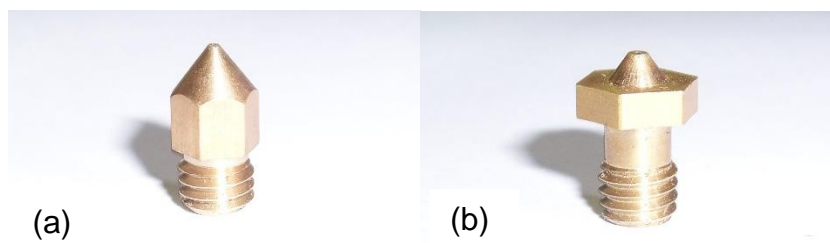


Figura 27. Tipos de boquillas: (a) Diámetro ϕ 0.3 mm, (b) Diámetro ϕ 0.5 mm,

3.2.2 Protección de acoples de boquilla

El diseño del protector del sistema hidráulico gaseoso, se realizó un diseño que sea capaz de sellar de forma hermética e igualmente se seleccionó un material adecuado para que no produzca ninguna reacción, el material elegido en este caso es un polímero, el cual este componente está conformado por dos partes principales los cuales se denominan comúnmente acople plástico hembra y macho.

Para el diseño del acople tipo macho, fue necesario tomar en consideración la geometría de la boquilla de cobre la cual irá precisamente en el centro de la misma, la que estará de forma fija unida a esta pieza el mismo que se indica en la *Figura 28*.



Figura 28. Acople plástico macho

El diseño para el acople tipo hembra se muestra en la *Figura 29*, este posee características que hace encajar con un ajuste preciso, con el acople plástico hembra pero también este a su vez debe acoplarse de forma hermética al recipiente de ensayos.

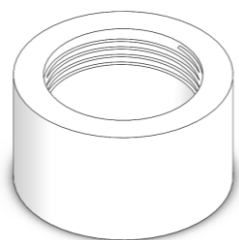


Figura 29. Acople plástico hembra

3.2.3 Controlador de flujo

Cuando se va establecer la selección del regulador es necesario saber con qué tipo de gas se va a trabajar, como también de que material está constituido este regulador, pero se debe tener en cuenta que los principales parámetros a tomarse en cuenta son los que muestran en la *Tabla 17*.

Tabla 17

Características de un regulador

Parámetros	Características
Gas de trabajo	Nitrógeno
Presión de salida	Presión máxima, pero depende del trabajo que se va a realizar con el gas
Caudal	Capacidad máxima, pero también depende de la aplicación que se va a realizar

Fuente: Linde (2017)

Una vez definida las principales características y tomando en cuenta que se va utilizar como gas el nitrógeno, el diseño de este regulador es ergonómico el cual nos permite ejecutar un ajuste en la presión y demás cualidades a convenir, este se muestra en la *Figura 30*.



Figura 30. Regulador de flujo

3.3 Diseño eléctrico

Para establecer un diseño de la parte eléctrica sobre este prototipo se procedió a definir todos los parámetros que intervienen en el experimento, el cual uno de las variables más importantes es el que produce la generación de un campo eléctrico, donde se procederá a seleccionar un componente adecuado que realice esta función.

3.3.1 Celdas eléctricas

La celda eléctrica es un dispositivo capaz de generar energía eléctrica o viceversa, estas existen en la actualidad en diversas formas según su aplicación o su condición de funcionamiento, mediante la cual este presenta una principal característica donde se muestra en la *Tabla 18*.

Tabla 18*Características de celdas eléctricas*

Tipos de celdas	Parámetros
	Características
Celdas galvanizadas	Tiene la capacidad de convertir una reacción química en energía eléctrica
Celdas electrolíticas	Tiene la capacidad de convertir la energía eléctrica en una reacción química en un área

Fuente: Clavijo (2002)

Entonces se procedió a escoger una celda electrolítica, la cual sirve para generar un campo eléctrico en una determinada área, pero también se debe definir su forma geométrica y material de cada uno de los electrodos el cual se indica en la *Tabla 19*.

Tabla 19*Parámetros de los electrodos*

Descripción	Características				
	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Material	Cantidad
Electrodo Tipo I	80	100	0.5	Cobre	2
Electrodo Tipo II	80	100	0.5	Cobre	1

Cada uno de estos tipos de celdas eléctricas se encuentra representadas como se muestran en las *Figura 31*, las cuales contienen sus primordiales características de diseño, como son las dimensiones y principales perforaciones, por donde este estará sujeto a un mecanismo que se describirá en la siguiente sección.

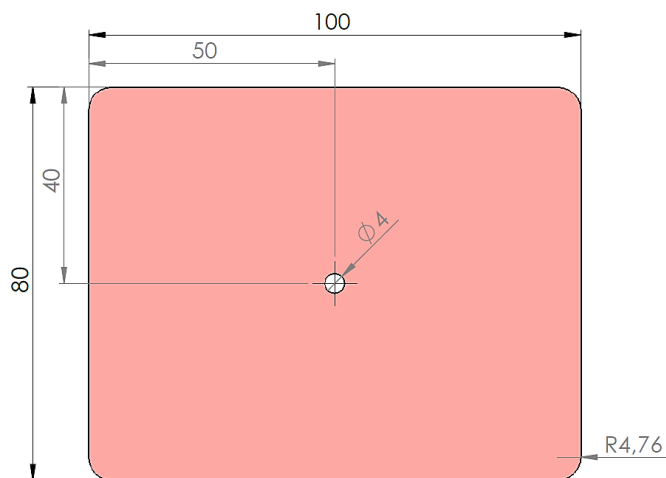


Figura 31. Características geométricas de los electrodos de cobre

3.3.2 Soporte del mecanismo para electrodo

Para el diseño del soporte del mecanismo se procedió a utilizar un material liviano como aislante a medida que este estará sujeto por los laterales del recipiente de vidrio, el material que cumple estas perspectivas es conocido como baquelita se muestra en la *Figura 32*, pero este ejecuta ciertas características geométricas las cuales nos permiten una mejor complementación cuando actúa con los demás componentes en un solo conjunto.

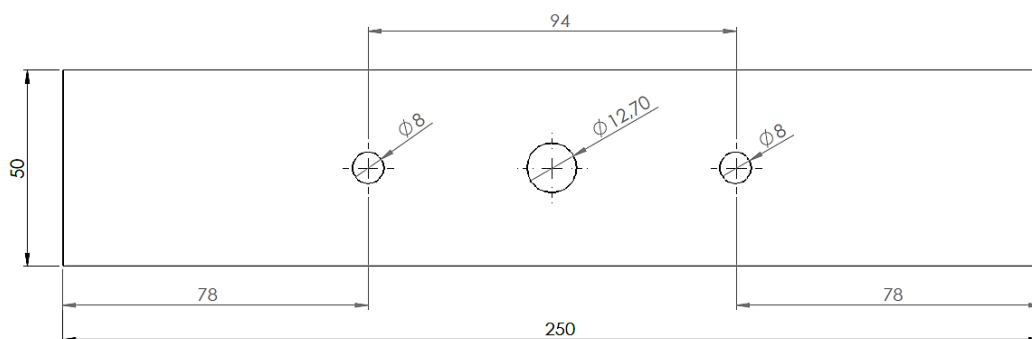


Figura 32. Soporte de baquelita con dimensiones

3.3.3 Posicionador de altura en electrodo

En el diseño de este componente fue necesario definir el mecanismo con el cual se desplazará en grupo con los demás componentes cuando se necesite regular la altura de trabajo. Entonces el modelo adecuado del posicionar de altura se trata de generar un eje tipo tornillo hueco como se muestra en la *Figura 33*, para que pueda deslizarse por la perforación que está en el centro del soporte del electrodo en conjunto con el electrodo tipo II, el material que se seleccionó para el diseño de los mismos es un polímero denominado como nylon.



Figura 33. Tornillo posicionador de nylon

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

4.1 Construcción del Reactor de Burbujas

Los componentes diseñados para formar parte del prototipo e iniciar su fabricación pasan por un proceso de selección de materiales, las mismas que deberán funcionar como un grupo cumpliendo el objetivo planteado inicialmente. Entonces una vez realizado el diseño en conjunto del reactor de burbujas como se muestra en la *Figura 34*, se procede a realizar la construcción de cada uno de los elementos.

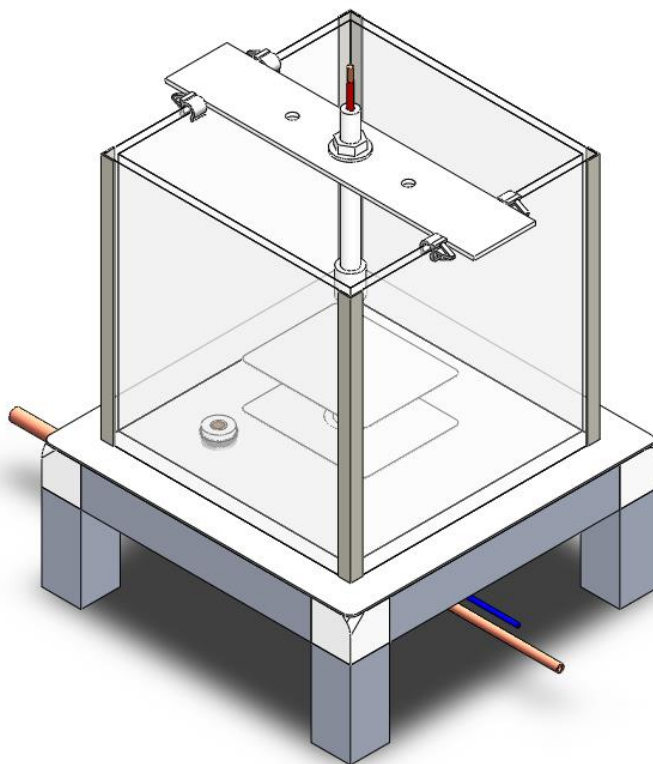


Figura 34. Prototipo del reactor de burbujas

Para la construcción en el taller de los diferentes componentes, estos parten de planos constructivos, los cuales constan de medidas y tolerancias necesarias para el ensamble, donde se puede observar cada uno de estos en la sección anexo A.



4.2 Proceso de construcción

4.2.1 Fabricación del recipiente de vidrio

Entonces el siguiente paso a tomar es la formación del armado del recipiente, para el cual se empleará varios componentes y materiales de fijación los mismos que estarán descritos en la *Tabla 20*.

Tabla 20

Componentes para la fabricación del recipiente de ensayos

Componentes del recipiente del reactor de burbujas	
Descripción	Ilustración
Se utilizó pegamento conocido comúnmente como silicona para poder unir todos los lados del recipiente de vidrio templado.	
El recipiente de ensayos consta de características geométricas para instalar en sus conexiones varios accesorios y en cada una de sus esquinas se coloca un soporte de aluminio.	

4.2.2 Fabricación del sistema hidráulico de los fluidos

Para la construcción del sistema hidráulico se procedió a definir según su tipo de fluido, pero también se debe tener en cuenta que todos sus accesorios son comúnmente de cobre, los cuales en las secciones dadas a continuación se describirá a cada uno.

- **Fabricación del sistema hidráulico para un fluido gaseoso**

El primer paso para la fabricación de un acople adecuado para la boquilla de cobre y la tubería de cobre, fue necesario definir varios accesorios como los que se muestra en la *Tabla 21*.

Tabla 21

Accesorios para la boquilla de cobre

DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ILUSTRACIÓN
Neplo de 1/8"	2	Bronce	
Anillo de compresión de 1/4"	2	Cobre	
Tuerca de compresión de 1/4"	2	Cobre	

Una vez definido los principales accesorios, entonces se procedió a hacer una rosca de 1/4" al Neplo de 1/8" de bronce como se muestra en las *Figura 35* y *Figura 36*, el cual este tendrá la función de acople tipo hembra para la boquilla de cobre.



Figura 35. Elaboración de una rosca interna al neplo de 1/8"



Figura 36. Rosca interna de 1/4" a neplo de 1/8"

Una vez conseguido que el neplo de 1/8" se convierta en un acople tipo hembra para la boquilla de cobre, igualmente a la vez este proceso se lo debe realizar dos veces para los dos distintos tipos de boquillas como se muestra en la *Figura 37*.



Figura 37. Conjunto entre el acople y boquilla

Como un último paso previo se procederá a unir el acople tipo hembra elaborado con los demás accesorios el cual formará un solo conjunto como se muestra en la *Figura 38*.

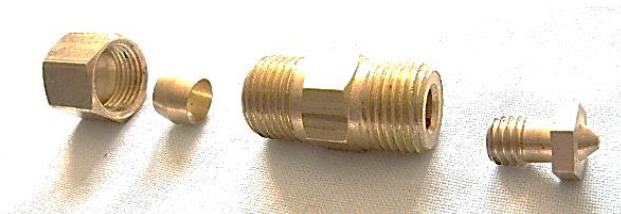


Figura 38. Accesorios para el acople hembra de la boquilla

Además, a su vez estos deben unirse a una tubería de cobre de 1/4" la cual consta de una curvatura de una dimensión especificada como se muestra en la *Figura 39*, por el cual transportará un fluido gaseoso en este caso será nitrógeno.

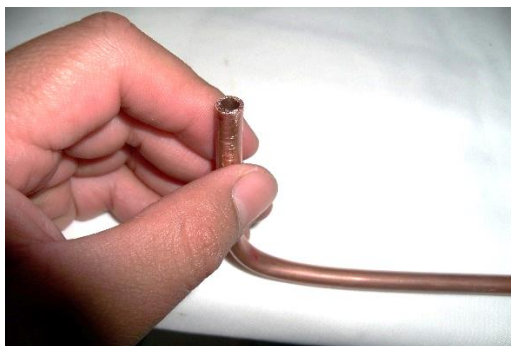




Figura 39. Curvatura en la tubería de cobre de 1/4"

- **Fabricación del sistema hidráulico para un fluido líquido**

En esta sección se construirá un acople adecuado para el desagüe de agua que existe dentro del recipiente de vidrio, motivo por el cual en la *Tabla 22* se muestra los principales accesorios a utilizarse para la conformación.

Tabla 22

Accesorios del acople del drenaje del fluido líquido

DESCRIPCIÓN	CANT	MATERIAL	ILUSTRACIÓN
Válvula tipo bola de 3/8"	1	Bronce	
Acople de cañería macho de 3/8"	1	Bronce	

Entonces se procede a realizar una curvatura de unas dimensiones adecuadas en la tubería de cobre de 3/8" la cual permitirá salir de mejor forma el fluido líquido como se muestra en la *Figura 40a*, pero también esta se encontrará acoplada al recipiente vidrio en su interior mediante un acople tipo macho de plástico como se muestra en la *Figura 40b*.

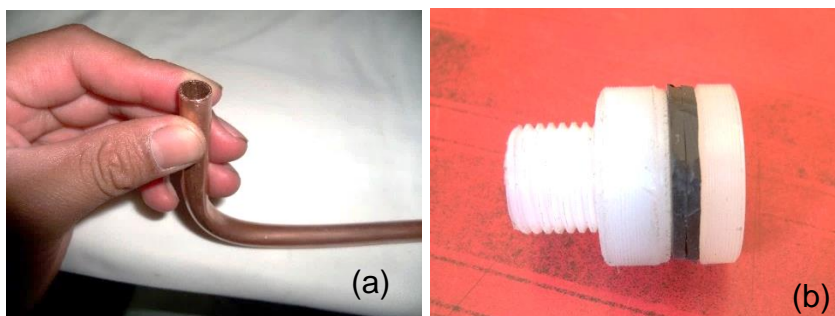


Figura 40. Acoples de conexión: (a) Tubería de cobre 3/8". (b) Acople tipo macho

- **Fabricación de la protección del sistema hidráulico gaseoso**

Es muy conveniente hacer un protector a los acoples y los accesorios de la boquilla de cobre, por el cual se mandó a maquinar un nuevo modelo de acople hembra-macho de nylon con un diámetro interno de 1 pulgada como se indica en la *Figura 41*, pero también a la vez este servirá para soporte que permitirá mantener fijo a cada uno de los electrodos tipo I.



Figura 41. Protector de nylon para acoples de boquilla

4.2.3 Fabricación del sistema generador del campo eléctrico

Para la elaboración de un campo eléctrico, se procedió a utilizar varios componentes de características y dimensiones diferentes, estos se describirán en la *Tabla 23*, dada a continuación la cual cumplen diferente función en el reactor de burbujas cuando interactúen.

Tabla 23

Características de componentes que producen un campo eléctrico


Componentes de un campo eléctrico	
Descripción	Ilustración
Obtener tres placas de cobre, para los distintos tipos de electrodos las mismas que deben estar limpias d impurezas.	

Figura 42. Placas de cobre

CONTINÚA 

Realizar una perforación en el centro con un diámetro de 4 mm en cada una de las placas, las cuales son denominadas como electrodo tipo I y II.



Figura 43. Placa perforada de cobre

Realización de una suelda especial en el electrodo tipo I con un cable # 10 de varios hilos.



Figura 44. Soldadura electrodo tipo I

Para el electrodo tipo II se realiza la misma suelda especial, pero con un cable # 10 de cable rígido.



Figura 45. Soldadura electrodo tipo

II

4.2.4 Fabricación del sistema mecánico

Para la formación del sistema mecánico móvil que tendrá con el electrodo tipo II, fue necesario construir un eje de polímero denominado nylon el cual consta de tres partes diferentes, estos cumplen la función del mecanismo eje rosca tal como se muestra en la

Figura 46, igualmente a la vez deben tener la capacidad de desplazarse verticalmente para poder regular la altura del ensayo de experimentación.



Figura 46. Eje de nylon para generar movimiento

Asimismo, se debe crear un soporte para el conjunto eje y electrodo móvil, este principalmente es de un material aislante al cual se realizará perforaciones, en una determinada superficie, este consta de varios agujeros simétricas al eje con un diámetro interno de 1/4" por donde estarán los ejes de nylon, pero también tendrá un agujero en el centro de un diámetro de ϕ 12 mm, el mismo como se muestra en la *Figura 47*.





Figura 47. Soporte aislante del conjunto eje-electrodo tipo II

4.2.5 Fabricación de base del reactor de burbujas

Para la construcción de una base para el recipiente de vidrio se utilizó materiales y componentes que complementen con la estética del reactor de burbujas, razón por la cual en la *Tabla 24*, se describirá las características principales de cada componente.

Tabla 24

Características de componentes de la base del reactor de burbujas

Componentes de la base del reactor de burbujas	
Características	Ilustración
<p>La estructura de la base del reactor es de aluminio el cual es resistente a una oxidación.</p>	 <p>Figura 48. Estructura de base reactor</p>
<p>Plancha de acero inoxidable la cual consta con dos perforaciones de forma diagonal para sus conexiones, a la misma vez se procedió a pintar de color blanco.</p>	 <p>Figura 49. Lamina de acero perforada</p>
<p>Unión de componentes mediante una pega resistente a los fluidos, la cual da como producto una base del reactor de burbujas.</p>	 <p>Figura 50. Base reactor de burbujas</p>

4.3 Ensamblaje de piezas del reactor de burbujas

Una vez finalizado los procesos de construcción de los componentes del reactor de burbujas, se procede a realizar el ensamblaje de cada uno de los conjuntos y sistemas

existentes en el prototipo, motivo por el cual se describirá de forma rápida y específica a cada uno de estas partes, el cual se empleó para generar un reactor de burbujas.


4.3.1 Ensamblaje de los sistemas mecánico, hidráulico y eléctrico

Para la formación del prototipo de un reactor de burbujas se procedió primeramente a realizar una inspección a cada componente, estos se muestran en la *Tabla 25* como también se describirá a cada uno de ellos.

Tabla 25

Componentes de la estructura del prototipo del reactor de burbujas

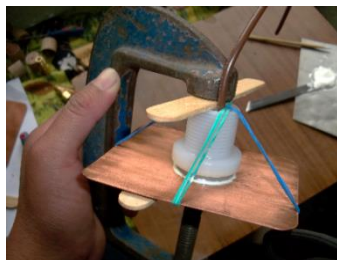
Componentes del prototipo del reactor de burbujas	
Descripción	Ilustración
Formación de un recipiente de vidrio de 20x20x20 cm, el cual consta con soportes de aluminio a sus extremos.	
Fijación entre la estructura de aluminio de 25x25x10 cm entre el recipiente para formar un solo cuerpo, los mismos que soportaran los sistemas de conexión.	
Para la fijación permanente en algunos componentes se aplicaron pegamentos con propiedades resistentes al agua y por estética.	

CONTINÚA 

Unión de acople macho con un anillo tipo alza el cual es diferente para cada boquilla.



Colocación fija del electrodo tipo I a un neplo macho con su respectivo anillo, el mismo que se aplicara pegamento Pegatanke, este proceso se repite para la otra boquilla.



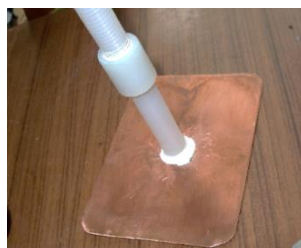
Formación de electrodos tipo I para cada boquilla con el respectivo protector para los accesorios de boquilla y sistema eléctrico.



En los electrodos tipo II se utilizó, una capa de pegamento ABRD Epoxy clear a la suelda especial de plata, para proteger de cualquier fluido.



Después de tener aproximadamente una hora de secado al electrodo tipo II se fija permanente al mecanismo tipo eje roscado.

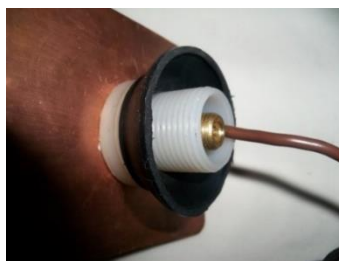


Utilización de diversos tipos de empaques para las conexiones de fluidos líquidos y gaseosos.



CONTINÚA 

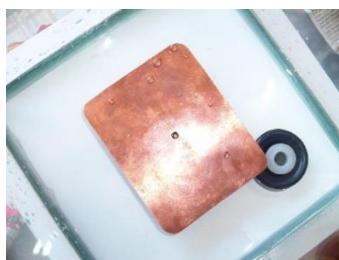
Por consecuente se destinará un empaque de mayor dimensión para los electrodos tipo I, como también un anillo de seguridad para no permitir filtrar los fluidos fácilmente.



Empaque de menor diámetro para el acople del desagüe del fluido líquido.



Acoples y empaques de los fluidos líquido e gaseoso instalados en el conjunto recipiente de vidrio y base del reactor de burbujas.



Colocación de seguros móviles en lados laterales del recipiente de vidrio, para soportar y fijar el electrodo tipo II.



Colocación de forma segura del protector del acople plástico tipo hembra, hacia el electrodo tipo II como a las demás conexiones pertinentes, esta fijación no es de forma permanente.



Conexiones de cables de los distintos electrodos mediante lagartos eléctricos o funda termo-retráctil.



Estructura del diseño del prototipo del reactor de burbujas, cuando este ensamblado de acuerdo al diseño propuesto inicialmente y planos constructivos.



4.4 Implementación del reactor de burbujas

Una vez realizado el ensamblaje de todos los componentes del reactor de burbujas, es necesario implementar varios accesorios para su debido funcionamiento, al prototipo se le coloca una conexión de suministro de forma directa al regulador de flujo del cilindro de nitrógeno tal como se muestra en la *Figura 51*, de igual forma a la tubería de fluido líquido se le debe colocar una llave de paso que sirve para drenar y frenar la salida del líquido.



Figura 51. Conexión al recipiente de nitrógeno

Asimismo, se procede a realizar la de mayor importancia la cual es establecer, una conexión adecuada con el equipo generador de voltaje como se muestra en la *Figura 52*, como también a la vez colocar un soporte para fijar de forma estable a la cámara de alta resolución como se muestra en la *Figura 53*, la cual nos ayudara a captar las deformaciones características de la burbuja.



Figura 52. Conexión con el generador de energía



Figura 53. Colocación fija de la cámara de alta resolución

4.4.1 Inspección de los sistemas aplicados

Se realizó una verificación general de todo el diseño, pero entre las más principales están: la conexión eléctrica la cual es adecuada en cada electrodo esta brinda seguridad para ser manipulada, la conexión del sistema del fluido líquido no existe fugas en los alrededores del recipiente ni en el drenaje del agua y la conexión del procedimiento gaseoso está asegurada y habilitada para ser operada.

4.4.2 Prueba de funcionamiento del prototipo

Para la prueba del funcionamiento adecuado de este diseño del reactor de burbujas se procedió a realizar de dos formas diferentes las cuales son: una con conexión a un campo eléctrico y sin conexión a un campo eléctrico, tal como se indica en la *Tabla 26*.

Tabla 26

Utilización del campo eléctrico según su conexión eléctrica

APLICACIÓN DEL CAMPO ELECTRICO	
Sin campo eléctrico	
Caso	Descripción




Figura 54. Generación de burbujas sin un campo eléctrico

El comportamiento de la burbuja generada desde una boquilla, que no interactúa con ningún ente de energía nos proporciona características particulares como: el contorno de la burbuja siempre se mantiene casi esférico, cuando se coloca a diferentes condiciones de trabajo.

CONTINÚA 

Con campo eléctrico

Caso	Descripción
 <p data-bbox="196 638 631 711">Figura 55. Generación de burbujas con un campo eléctrico</p>	<p data-bbox="634 380 1218 711">Cuando la burbuja es generada mediante un campo eléctrico este presenta características específicas: el contorno de la burbuja se alarga en dirección de la corriente, esto a la vez depende de las variables de experimentación como el caudal, presión y diámetro de boquilla.</p>

CAPÍTULO V

5. EXPERIMENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Experimentación

Esta investigación, se basa principalmente basándose en una inmensa revisión bibliográfica, la cual nos permite realizar de una manera más adecuada la experimentación y el manejo de las principales variables que tiene este proceso, también nos permitirá recolectar de un modo más eficiente los datos obtenidos de cada uno de los ensayos.

5.1.1 Equipos e Instrumentos

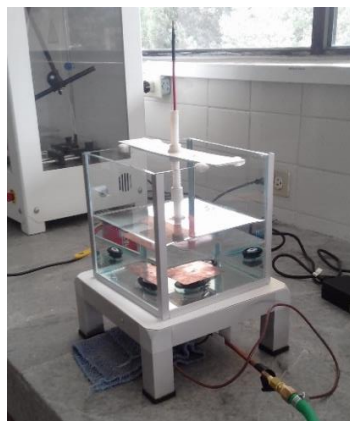
Para desarrollar los diversos experimentos se utilizó las instalaciones del Laboratorio de Reología y Fluidos Complejos, donde para realizar el análisis y comportamiento de una burbuja en un campo eléctrico en un flujo multifásico, se utilizarán los equipos que intervienen en el sistema del reactor de burbujas, los mismos que algunos de ellos fueron facilitados por el coordinador del laboratorio a cargo del Ing. Luis Carrión, como también se aplicara el diseño del prototipo.

5.1.2 Sistema del reactor de burbujas

Para poder definir cuáles son todos los componentes de este sistema se indica en la *Tabla 27*, igualmente se indicará a manera detallada a cada uno de los principales elementos que intervienen en el procedimiento del reactor de burbujas los cuales se muestran en la *Tabla 28*, también a la misma vez el conjunto de lentes de la cámara que se aplicó en el proceso de experimentación el cual se detalla en la *Tabla 29*.

Tabla 27*Equipo del sistema reactor de burbujas***Sistema del reactor de burbujas****Figura 56.** Sistema del reactor de burbujas**Tabla 28***Equipos del sistema reactor de burbujas***Equipo del sistema reactor de burbujas****Características****Ilustración**

Prototipo reactor de burbujas
 Boquillas: ϕ 0.3 mm y ϕ 0.5mm
 Electrodo: Cobre

**Figura 57.** Reactor de burbujasCONTINÚA 

Fuente de alto voltaje Genvolt

Modelo: 73030

Salida de Voltaje: 0 - 30 kV

Salida de corriente: 1 mA

Salida de Poder: 30 W



Figura 58. Generador de voltaje

Cámara de alta velocidad

Marca PHANTOM

Modelo: V2512

Input: 10 AMP MAX@24VDC



Figura 59. Phantom V2512

Luces Led 1

Marca: Gs Vitec

Modelo: LT-V9-15

SN: GS01766

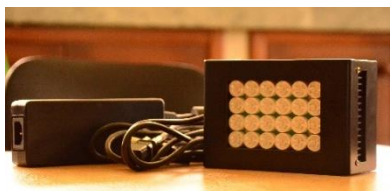


Figura 60. Luces Led I

Cilindro de gas experimental

Tipo gas: Nitrógeno

Volumen: 2 m³ máx.

Presión máx.: 2200 psi

Presión mín.: 29 psi



Figura 61. Recipiente de Nitrógeno

Laptop hp

Procesador: Intel Core i7

RAM: 6GB

Software: PCC 2.8



Figura 62. PC software PCC2.8

Tabla 29*Acoples y lentes de la cámara aplicados al experimento*

Elementos del conjunto de lentes de la cámara	
Características	Ilustración

Adaptador

Marca: Nikon

**Figura 63.** Adaptador Nikon

K1 CENTRIMAX MAIN BODY

Marca: Infinity

**Figura 64.** Lente Centrimax K1

Lente Objetivo MX-2

Marca: Infinity

Series objective 0.85x–1.28x;

**Figura 65.** Lente objetivo MX-2

Lente objetivo MX-3

Marca: Infinity

Series objective 1.16x–1.60x; 254-
170mm WD**Figura 66.** Lente objetivo MX-3

5.1.3 Fluidos de trabajo

En esta investigación se procederá a utilizar dos tipos diferentes de fluidos multifásicos, de tal manera que estos se aplicaran para varios procedimientos experimentales con distintas mociones, a continuación, se expresara a cada fluido que se aplicara en cada ensayo con sus respectivas características.

- **Agua**

- Proveedor: Instalaciones ESPE
- Volumen: 3.5 litros (por cada uno de los ensayos)
- Densidad: 998 kg/m³
- Conductividad eléctrica: 0.04 μS/cm
- Permitividad relativa: 80

- **Nitrógeno**

- Proveedor: Linde
- Volumen: 4 litros aprox. (por cada ensayo)
- Densidad: 1.25 kg/m³
- Conductividad eléctrica: 10⁶ S/cm
- Permitividad relativa: 1.0058

5.1.4 Especificación de parámetros

A continuación, se describirá a las principales variables que actuaran en el procedimiento experimental, pero en el anexo C se detallara el uso adecuado.

- **Diámetro de boquillas**

Es fundamental aplicar los dos diferentes tipos de boquillas de diámetros de ϕ 0.3 mm y ϕ 0.5 mm, argumentando el uso idóneo de cada uno de estos para realizar las comparaciones características del comportamiento en la formación de las burbujas, cuando interactúan con el caudal, la presión y el voltaje.

- **Voltaje**

Esta fuente de energía en forma de voltaje influye en la generación de burbujas en un campo eléctrico, este cumple con el efecto de distorsionar a la formación de la burbuja en el momento que este se genera desde la boquilla, pero también las fuerzas de desplazamiento sufren un cambio brusco cuando actúan directamente en la hilera de burbujas. Los distintos tipos de pruebas están constituidas de dos etapas: la primera etapa es permitir que la burbuja se estabilice en el instante que se aplica un voltaje y la segunda consiste en estabilizar la columna de burbujas teniendo en consideración que los valores del voltaje aplicados no tengan alteraciones. El voltaje aplicado estaba en un rango de 0.0 kV a 9.0 kV con intervalos de 1.5 kV, estos son indispensables en los cuatro grupos experimentales que contienen tres ensayos, cada uno con diferentes condiciones de trabajo.

- **Caudal**

En este proceso de experimentación en cada uno de los ensayos, se deben realizar diferentes pruebas con diversos flujos volumétricos, tal fue el caso que se tomó como consideración tener tres caudales que empiezan desde, 0.15 lpm, 0.30 lpm y 0.45 lpm, los mismo que fueron clasificados como caudal mínimo, caudal intermedio y caudal máximo, estos pueden observarse en la *Figura 67*.

Una vez definido los caudales que existirán para ese tipo de experimentos, se tiene como un conocimiento previo que si se coloca a un caudal mínimo se puede apreciar la distorsión de la burbuja que está ascendiendo, cuando intervienen las diferentes fuerzas que lo desplazan. Cabe recalcar que para obtener estas imágenes se procedió a capturar a una resolución máxima de 1280 x 800, como también a una velocidad de 4000 c/s con un periodo de 250 μ s.

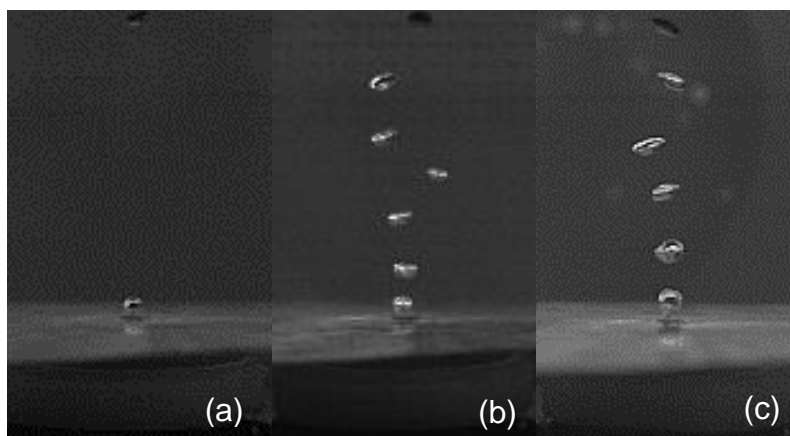


Figura 67. Tipos de burbujas con caudales: (a) $Q_{\text{mín}}$, (b) Q_{int} , (c) $Q_{\text{máx}}$

- **Presión**

Las tres presiones que se emplearan en el procedimiento experimental se catalogan como presión mínima, 500 psi, presión intermedia, 1500 psi, y presión máxima, 2200 psi. Una vez fijado los rangos de presiones al cual se originarán la hilera de burbujas, se interpretará la cualidad que tiene cada una de estas mociones, basándose en imágenes de alta resolución de 1280 x 800, a la velocidad de 5000 c/s con un periodo de 250 μ s.

5.1.5 Metodología de trabajo

En esta investigación se aplicará esta metodología de trabajo la cual se encuentra resumida mediante un diagrama de flujo tal como se muestra en la *Figura 68*. Asimismo,

en este diagrama de flujo el proceso de cada uno de los ensayos, se debe considerar los aspectos mencionados a continuación:

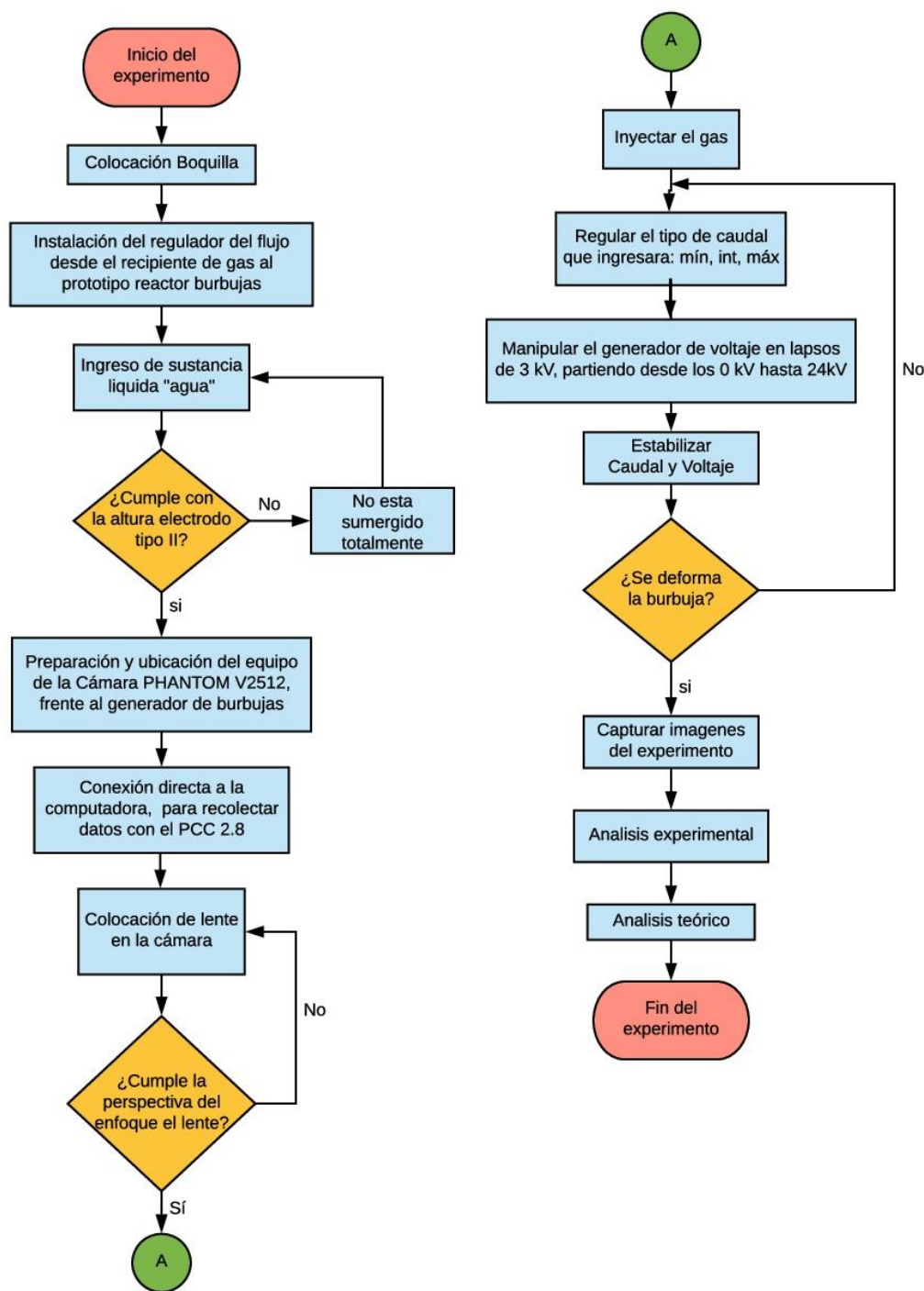


Figura 68. Diagrama de flujo del proceso de experimentación.

- El agua debe cambiarse en cada uno de los ensayos
- La boquilla debe ser cambiada para la formación de burbujas con diferentes características.

5.2 Análisis de resultados

En la presente sección se revisará los resultados obtenidos después de todos los ensayos producidos en la experimentación, de tal manera que se analizara el comportamiento de las burbujas que fueron generados con diferentes diámetros de boquillas, asimismo la manipulación realizada de los parámetros como el caudal y la presión, estos permiten definir: la velocidad, fuerzas de desplazamiento de la burbuja y fuerzas ejercidas en el campo eléctrico.

Para la interpretación de los diversos grupos de ensayos se aplicó una cámara PHANTOM de alta velocidad de serie V2512, la misma que contiene un software conocido como PCC 2.8 este nos permite representar y caracterizar en forma de valores numéricos a la burbuja. Una vez definido los medios para la caracterización es necesario desarrollar la validación de resultados, en el que intervienen un número adimensional.

5.2.1 Clasificación de grupos de ensayos experimentales

En la *Tabla 30* se muestra la clasificación de los grupos a estudiarse en varios contextos experimentales que sucederán en el reactor de burbujas con sus respectivas mociones de trabajo.

Tabla 30*Clasificación de grupos y ensayos experimentales*

Boquilla con diámetro de ϕ : 0,3 mm	
GRUPO I: Flujo volumétrico variable y presión constante	Ensayo I: Caudal mínimo y presión constante.
	Ensayo II: Caudal intermedio y presión constante.
	Ensayo III: Caudal máximo y presión constante.
GRUPO II: Presión variable y flujo volumétrico constante	Ensayo I: Presión mínima y caudal constante.
	Ensayo II: Presión intermedia y caudal constante.
	Ensayo III: Presión máxima y caudal constante.
Boquilla con diámetro de ϕ : 0,5 mm	
GRUPO III: Flujo volumétrico variable y presión constante	Ensayo I: Caudal mínimo y presión constante.
	Ensayo II: Caudal intermedio y presión constante.
	Ensayo III: Caudal máximo y presión constante.
GRUPO IV: Presión variable y flujo volumétrico constante	Ensayo I: Presión mínima y caudal constante.
	Ensayo II: Presión intermedia y caudal constante.
	Ensayo III: Presión máxima y caudal constante.

5.2.2 Análisis de una burbuja por imágenes digitales

Entre las principales cualidades que se puede conseguir desde las imágenes originales grabadas mediante un algoritmo de procesamiento de imagen digital, es la relación de aspecto, el diámetro equivalente de la burbuja, la velocidad y otras propiedades de la burbuja. El procedimiento que permite detectar a la burbuja desde representaciones digitales se indica en la *Figura 69*, la misma técnica es aplicada en varias investigaciones.

Las imágenes originales fueron captadas por el equipo fotográfico, una cámara PHANTON de alta velocidad con serie V2512, este registro fotografías con en el formato a color RGB la misma que se transformó a cada cuadro de la imagen en formato de escala de grises. En cada cuadro de la imagen obtenida en los diferentes grupos de ensayos se debe considerar la calidad de la imagen, está fue capturada a una resolución

de 1280 x 800, a una velocidad de 5000 c/s con un periodo de 200 μ s, esta representación se sometió a varios pre ajustes, desde un panel denominado como herramientas de imagen, este contiene varias sugerencias la que nos permiten definir de una manera más efectiva y reluciente el contorno de la burbuja.

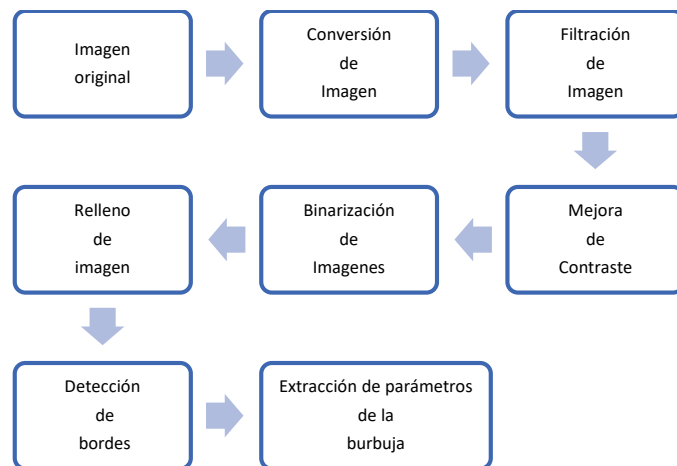


Figura 69. Proceso de digitalización de imágenes mediante un algoritmo

5.2.3 Características geométricas de la burbuja

La característica geométrica que tiene la burbuja se muestra en la *Figura 70*, está burbuja se forma desde un diámetro de boquilla, φ , se alarga en dirección del eje mayor, h , igualmente se comprime en orientación del eje menor, w , el ángulo de contacto, θ_c , que comprende desde la placa del electrodo al contorno inicial de la burbuja y el ángulo alrededor de la burbuja, θ , esta comprendido entre la normal y las dirección del campo eléctrico en la superficie de la burbuja. Igualmente se debe considerar la relación de aspecto de la burbuja, $AR = w/h$.

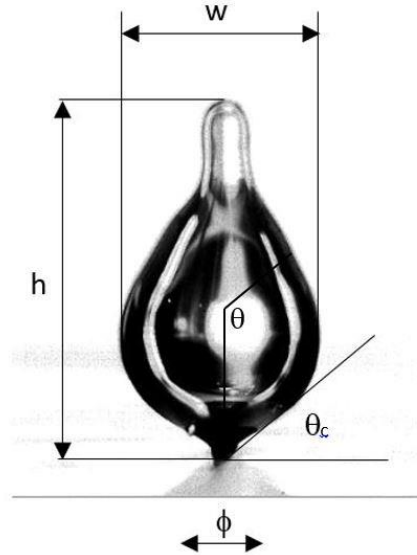


Figura 70. Representación de las dimensiones de la burbuja

5.2.4 Generación de burbujas en dirección ascendente

En este procedimiento se utilizará como particularidad boquillas con un diámetro ϕ 0.3 mm y ϕ 0.5 mm, de tal forma que interactuara en una superficie con flujos multifásicos: el agua y el nitrógeno, estas acataran mociones experimentales en los sucesos: evolución y desprendimiento de una burbuja que interactúa en una zona con carga eléctrica. Las mismas que se analizaran e interpretara las características geométricas de la burbuja.

- **Evolución de una burbuja con un diámetro ϕ 0.3 mm**

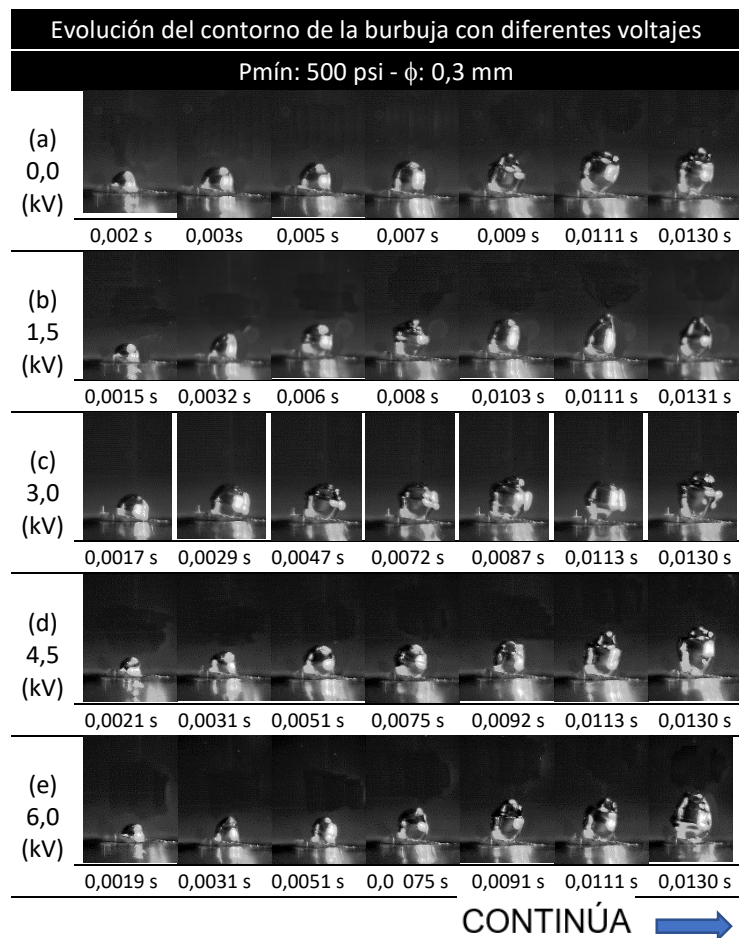
La evolución de las burbujas es conocida mediante tres etapas: expulsión lenta, expansión del volumen y desprendimiento de la burbuja. Estas se dispersarán en dirección ascendente en una región eléctrica del fluido, para conocer la deformación existente en los contornos de la burbuja esta será explícitamente representada en función del tiempo.

- **GRUPO I:** Flujo volumétrico variable y presión constante

○ **GRUPO II:** Presión variable y Flujo volumétrico constante

Estos grupos contienen tres diferentes tipos de ensayos, cada uno comprende consideraciones experimentales distintas. En esta sección se aplica un diámetro de boquilla de ϕ 0.3 mm, para analizar la evolución de la burbuja se eligió el suceso más óptimo, este contiene la moción: una presión mínima de 500 psi y un caudal constante de 0.30 lpm.

Cuando se aplica voltajes de 0.0 kV a 9.0 kV, la burbuja se desprende aproximadamente a 0.0130 ± 0.0001 s, estos se indican en la *Figura 71*, por lo tanto, la siguiente burbuja se forma de inmediato al tener condiciones experimentales muy elevadas.



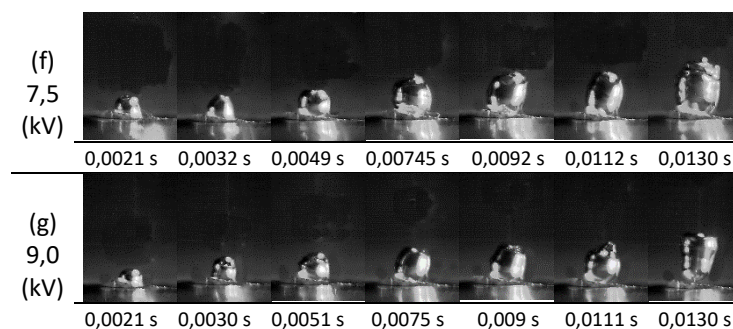


Figura 71. Crecimiento de burbuja a una $P_{\text{mín}}$: 500 psi y Q_{cte} : 0.30 lpm

El cuello de burbuja se forma cuando se produce en 0.0112 ± 0.0001 s. En la *Figura 71b-g*, se muestran que los tiempos de crecimiento se incrementan a medida que las burbujas se alargan en la dirección del campo eléctrico.

- **Evolución de una burbuja con un diámetro ϕ 0.5 mm**

La interpretación del comportamiento del contorno de la burbuja a diferentes condiciones de operación se definirá en función del tiempo, estas cuando ascienden se identifican en tres etapas: primera etapa existe un periodo de expulsión de forma lenta desde su aparición desde el borde del orificio, segunda etapa consiste en el crecimiento constante del volumen de la burbuja y tercera etapa es cuando la burbuja se desprende totalmente del borde.

- **GRUPO III:** Flujo volumétrico variable y presión constante

Al utilizar un caudal mínimo de 0.15 lpm y presión constante de 2200 psi, aplicado a voltajes de 0.0 kV a 9.0 kV con intervalos de 1.5 kV, la burbuja se desprende aproximadamente a 0.0143 ± 0.0001 s, esto se muestra en la *Figura 72*, asimismo la otra burbuja se forma de inmediato por la alta presión de trabajo.

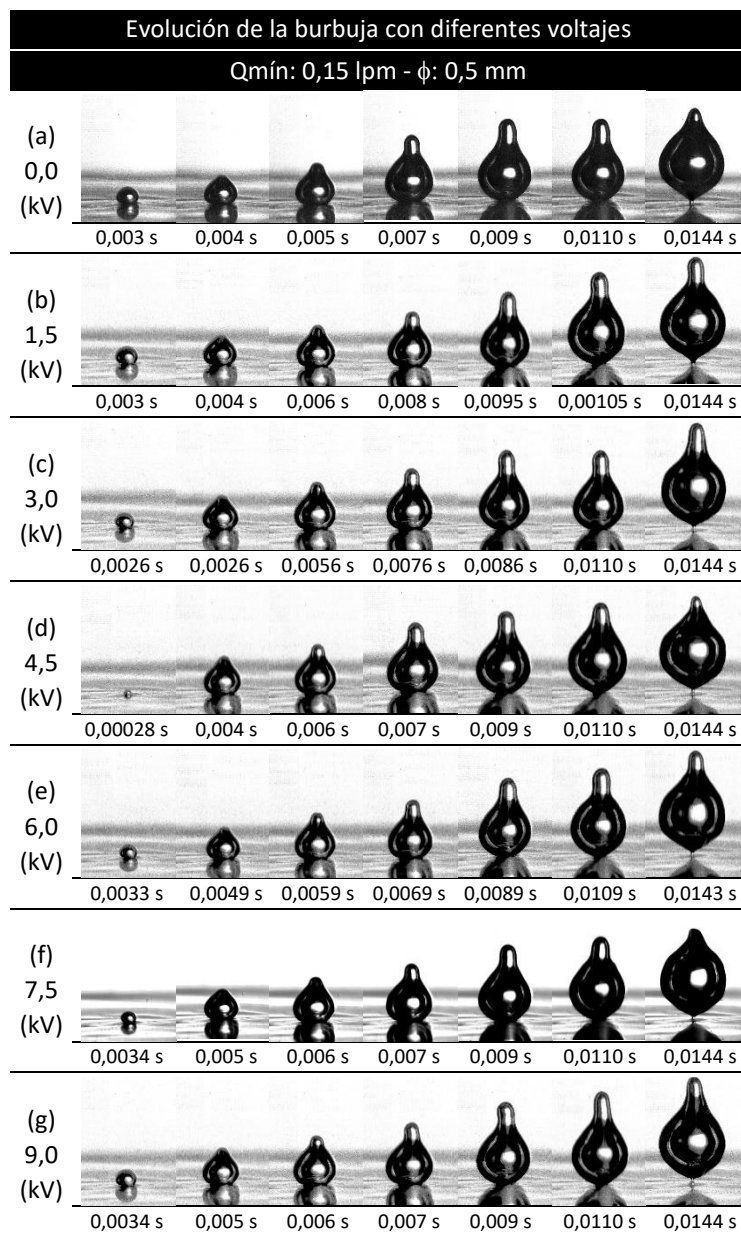


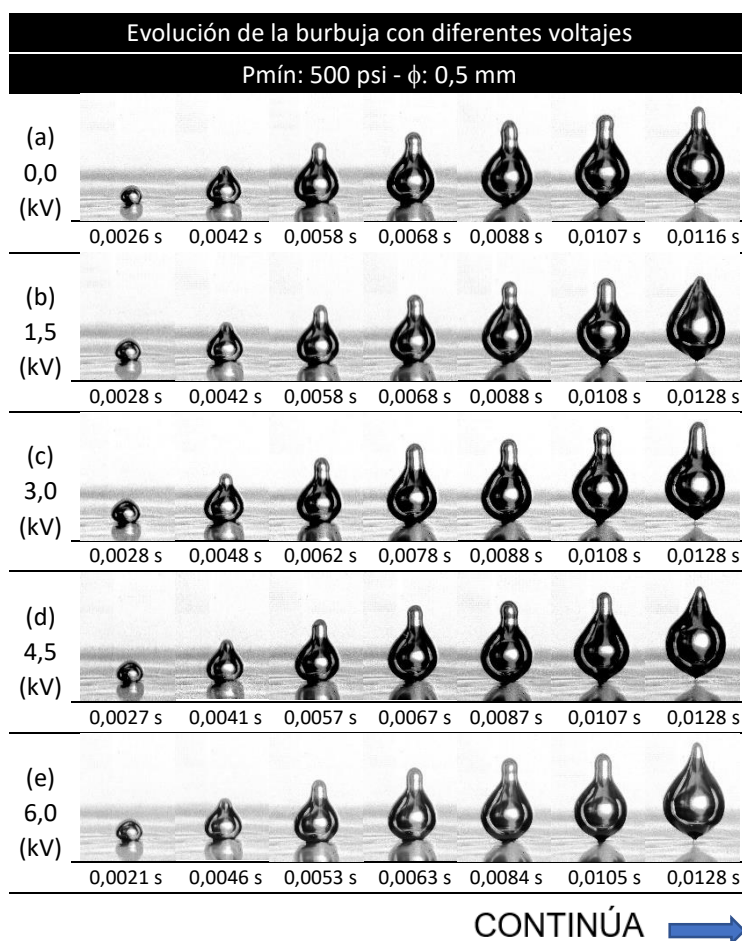
Figura 72. Crecimiento de burbuja a un Q_{mín}: 0.15 lpm y Pcte: 2200 psi

En este ensayo el cuello de burbuja no es muy visible, porque se distorsiona la burbuja por utilizar una presión de 2200 psi, el mismo que provoca que exista una cresta muy prolongada en su parte superior.

Pero se puede observar que la burbuja se alarga cuando se produce en 0.0089 ± 0.0001 s. Mientras tanto en la *Figura 72c-g*, se muestran que el tiempo de crecimiento se aumenta a medida que las burbujas se expanden en la dirección de la zona eléctrica.

○ **GRUPO IV:** Presión variable y Flujo volumétrico constante

Se utilizó una presión mínima de 500 psi y un caudal constante aproximado de 0.30 lpm, a diferentes voltajes desde 0.0 kV a 9.0 kV, basándose en estas condiciones la burbuja se desprende aproximadamente a 0.0120 ± 0.0006 s, los aspectos de las burbujas se muestran en la *Figura 73*.



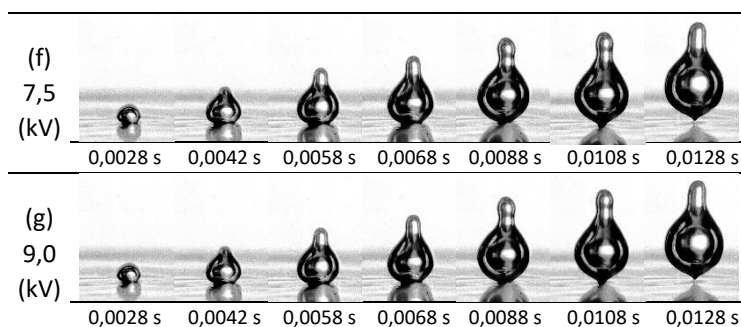


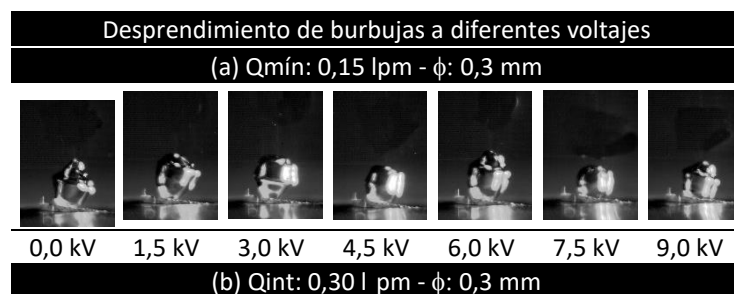
Figura 73. Crecimiento de burbuja a una $P_{mín}$: 500 psi y Q_{cte} : 0.30 lpm

Al usar una presión de 500 psi este igualmente presenta una deformación en forma de cresta muy prolongada, por ende, el cuello de burbuja no es visible, pero se puede observar que la burbuja se alarga cuando se produce en 0.0060 ± 0.0003 s, esto se puede comprobar en *Figura 73b-g*.

- **Desprendimiento de una burbuja con un diámetro ϕ 0.3 mm**

- **GRUPO I:** Flujo volumétrico variable y presión constante

En este grupo la interpretación se basará en función del tiempo, el aspecto de la burbuja y la relación de aspecto, estos se interrelacionan con los voltajes comprendidos desde 0.0 kV a 9.0 kV en intervalos de 1.5 kV, considerando que la energía aplicada está a una distancia entre electrodos de 50 mm, esta se muestra en la *Figura 74*



CONTINÚA →

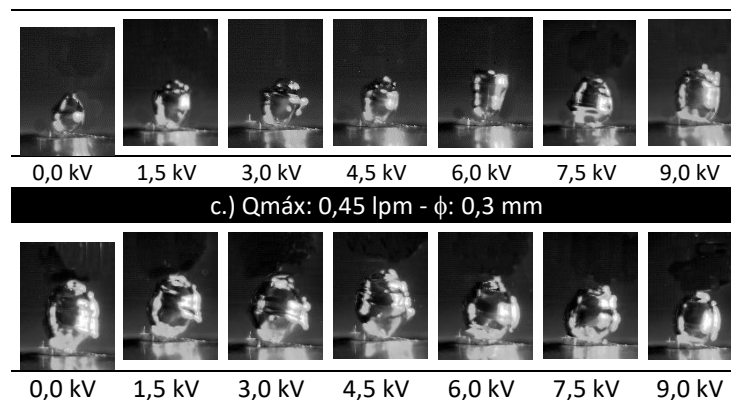


Figura 74. Desprendimiento a: $Q_{\text{mín}}$: 0.15 lpm, Q_{int} : 0.30 lpm, $Q_{\text{máx}}$: 0.45 lpm

La principal característica que se consideró para diferenciar las imágenes de la burbuja es la relación de aspecto, esta se relaciona con las distancias del eje mayor y menor de la burbuja, tal como se indica en la *Figura 70*. En la mayoría de los ensayos se generó una relación de aspecto promedio el cual establece que existe un incremento relativo a medida que aumenta la corriente, cada uno de los casos está representado en la *Tabla 31*.

Tabla 31

Interpretación del grupo I cuando una burbuja se desprende

GRUPO I	Condiciones experimentales			AR	Caso
	Diámetro	Caudal	Presión		
Ensayo I	0,30 mm	0,15 lpm	2200 psi	4%	Figura 74a
Ensayo II	0,30 mm	0,30 lpm	2200 psi	4%	Figura 74b
Ensayo III	0,30 mm	0,45 lpm	2200 psi	6%	Figura 74c

Este grupo no se pudo percibir con gran claridad el contorno de las burbujas por una mala configuración con el umbral de los lentes de la cámara, igualmente la burbuja está distorsionada con una cresta muy pequeña, el cual existe incertidumbre en este grupo experimental.

- **GRUPO II:** Presión variable y Flujo volumétrico constante

En la *Figura 75* se observa los resultados experimentales los cuales estas clasificados según el voltaje, también la distancia existente entre los electrodos es de 50 mm.

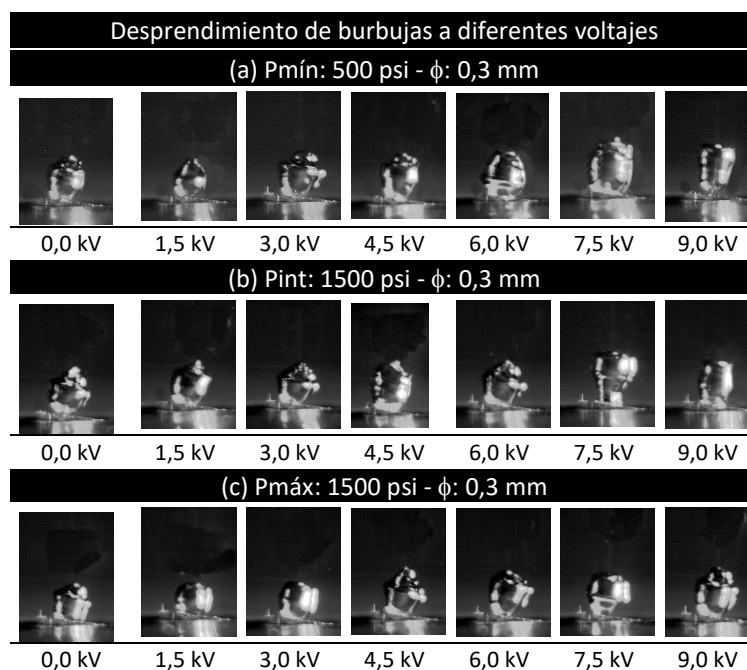


Figura 75. Desprendimiento a: P_{mín}: 500 psi, P_{int}: 1500 psi, P_{máx}: 2200 psi

En los aspectos de las burbujas se logra ver que cuando existe incremento en la corriente, la relación de aspecto promedio de cada ensayo aumenta tal como se indica en la *Tabla 32*, esto causa que la burbuja se deforme considerablemente en sus polos, el cual le permite ser más esbelta.

Tabla 32.

Interpretación del grupo II cuando una burbuja se desprende

GRUPO II	Condiciones experimentales			AR	Caso
	Diámetro	Presión	Caudal		
Ensayo I	0,30 mm	500 psi	0,30 lpm	10%	Figura 75a
Ensayo II	0,30 mm	1500 psi	0,30 lpm	10%	Figura 75b
Ensayo III	0,30 mm	2200 psi	0,30 lpm	14%	Figura 75c

También en este grupo existe incertidumbre en la obtención de datos, se debe al aspecto de la burbuja por la existencia de una cresta diminuta en la punta y de la mala configuración del umbral del lente.

- **Desprendimiento de una burbuja con un diámetro ϕ 0.5 mm**

- **GRUPO III:** Flujo volumétrico variable y presión constante

Los resultados de los aspectos de burbujas se muestran en la *Figura 76*, esto se obtuvo al aplicar una carga eléctrica DC desde 0.0 kV a 9.0 kV, el contorno de burbujas a punto de desprenderse se formó desde electrodos que están a una distancia de 50 mm.

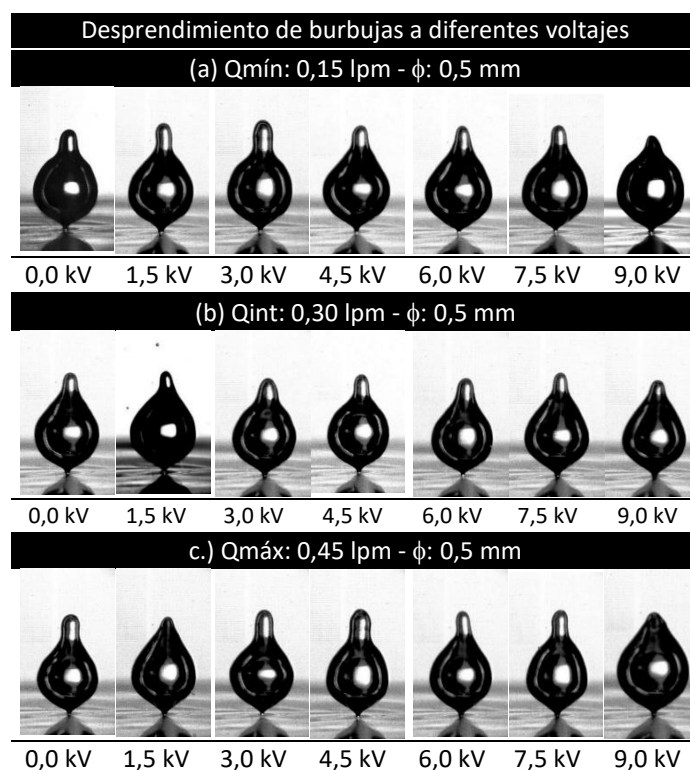


Figura 76. Desprendimiento a: $Q_{\text{mín}}$: 0.15 lpm, Q_{int} : 0.30 lpm, $Q_{\text{máx}}$: 0.45 lpm

Los aspectos de burbujas se diferencian en su relación de aspecto, los cuales indican el incremento que se obtuvo en cada uno de los casos tal como se indica en la *Tabla 33*. El aumento que se obtuvo en cada caso permite definir que existe alargamiento en sus polos, esto se debe a que las fuerzas resultantes de inercia y flotabilidad exceden las fuerzas de la tensión superficial.

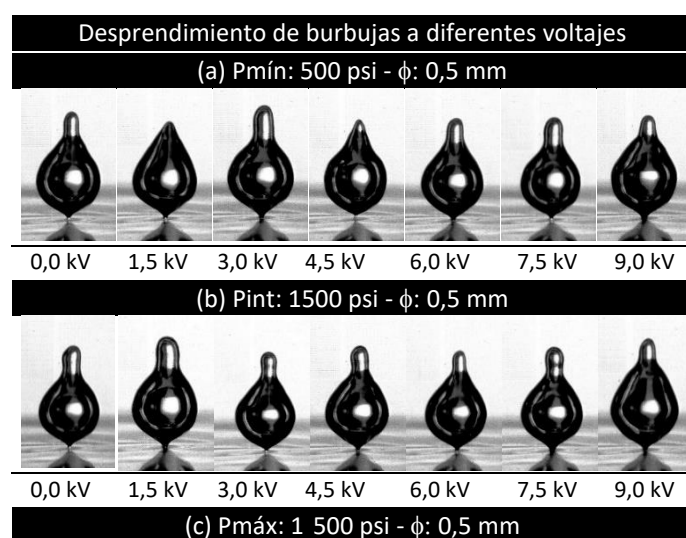
Tabla 33

Interpretación del grupo III cuando una burbuja se desprende

GRUPO III	Condiciones experimentales			AR	Caso
	Diámetro	Caudal	Presión		
Ensayo I	0,50 mm	0,15 lpm	2200 psi	20,5%	Figura 76 ^a
Ensayo II	0,50 mm	0,30 lpm	2201 psi	9,9%	Figura 76b
Ensayo III	0,50 mm	0,45 lpm	2202 psi	12,4%	Figura 76c

- **GRUPO IV:** Presión variable y Flujo volumétrico constante

En la *Figura 77* se muestran los resultados de las imágenes alcanzados cuando interactúan con una carga eléctrica variable, donde los electrodos están separados a una distancia de 50 mm.



CONTINÚA

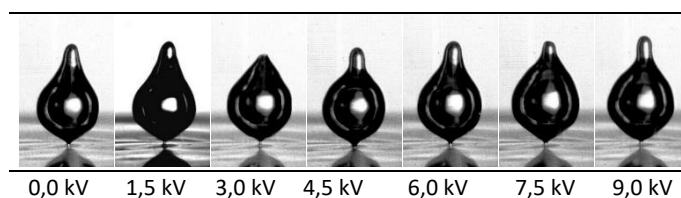


Figura 77. Desprendimiento a: Pmín: 500 psi, Pint: 1500 psi, Pmáx: 2200 psi

En la *Tabla 34*, se indican los diferentes ensayos que tienen un incremento considerable en su relación de aspecto promedio, en especial en los dos últimos casos los cuales se alargaron en una cantidad considerable en dirección del campo eléctrico, esto sucedió cuando las fuerzas que actúan para equilibrar a la burbuja es mayor a la fuerza de la tensión superficial.

Tabla 34

Interpretación del grupo IV cuando una burbuja se desprende

GRUPO IV	Condiciones experimentales			AR	Caso
	Díámetro	Presión	Caudal		
Ensayo I	0,50 mm	500 psi	0,30 lpm	2,3%	Figura 77a
Ensayo II	0,50 mm	1500 psi	0,30 lpm	9,6%	Figura 77b
Ensayo III	0,50 mm	2200 psi	0,30 lpm	10,2%	Figura 77c

5.2.5 Velocidad

Para calcular la velocidad teórica se procedió a utilizar una fórmula propuesta por Tomiyama et al. (2002), el cual es aplicado para burbujas que interactúan con líquidos newtonianos puros y contaminados, la cual se representa en la ecuación (6).

$$V_T = \frac{\sin^{-1} \sqrt{1-E^2} - E\sqrt{1-E^2}}{1-E^2} \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho_l d_e} E^{\frac{4}{3}} + \frac{\Delta\rho g d_e}{2\rho_l} \frac{E^{\frac{2}{3}}}{1-E^2}} \quad (6)$$

Dónde: E es la relación de aspecto, σ es la tensión superficial del agua, ρ_l es densidad del líquido, $\Delta\rho$ es diferencia de densidades entre fase líquida y gaseosa, g es la aceleración de la gravedad y d_e el diámetro equivalente de la burbuja.

- **Diámetro equivalente**

Este parámetro se encuentra relacionado con los ejes principales de la burbuja el cual esta expresado en la *Figura 70*, por estas distancias proporcionadas se permite obtener el volumen de la burbuja aplicando la ecuación (7) y a la vez se puede obtener el diámetro equivalente de la burbuja por la ecuación (8).

$$V_B = \frac{\pi}{6} h w^2 \quad (7)$$

$$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6V_B}{\pi}} \quad (8)$$

Dónde: V_B es el volumen de la burbuja el cual esta expresado en parámetros eje mayor, h , y eje menor, w . Entonces para llevar a cabo la validación de las diferentes distancias que se obtuvo de cada muestra de las burbujas se seleccionó una área, el mismo que está situado desde el borde del orificio hasta una altura de 10 mm esta se indica en la *Figura 78*, entonces el software PCC 2.8 de la cámara PHANTON con la altura propuesta nos concede una escala de trabajo la cual esta propuesta en mm/pix.

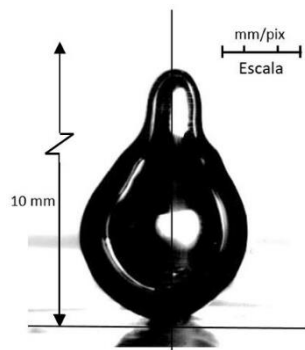


Figura 78. Calibración de imagen de la burbuja en mm/pix

Una vez familiarizado con los parámetros que intervienen en el desarrollo de la velocidad, se procede a describir en cada sección a cada uno de las diferentes mociones planteadas en cada proceso experimental.

- **Número de Bond**

El parámetro adimensional número de Bond permite analizar las fuerzas de tensiones superficiales y gravitacionales, Este número es de vital importancia, ya que nos permite determinar el factor mencionado como E que es la relación de aspecto, se debe considerar como un valor primordial en la ecuación, la cual se indica en la ecuación (9).

$$Bo = \frac{g\Delta\rho d^2}{\sigma} \quad (9)$$

En donde: $\Delta\rho$ es el diferencial de densidades, g la aceleración de la gravedad, d es el diámetro equivalente de la burbuja y σ es la tensión superficial del líquido. Para definir el uso adecuado de la relación de aspecto existen distintas correlaciones propuestas por varios investigadores, los mismos que mencionan que el valor puede variar dependiendo de la magnitud de oscilación de la forma inicial, como también si alguna correlación está en función del número adimensional Bond, este puede ser diferente porque dependen en gran medida del desprendimiento de la formación de la burbuja. Entre las correlaciones que cumplen los objetivos del tipo de fluido suministrado están las mencionadas por Wellek et al. (1966) esta puede ser utilizada para fluidos no contaminados que contengan una viscosidad muy baja para burbujas oscilantes esta se representa como la ecuación (10), mientras que según Okawa et al. (2003) modifico la correlación que fue propuesta por Wellek et al. (1966) la cual es utilizada para fluidos líquidos contaminados teniendo en cuenta que esta ecuación (11) es siempre valida cuando el número de Bond tiene la siguiente afirmación $Bo < 40$.

$$E = \frac{1}{1+0.163Bo^{0.757}} \quad (10)$$

$$E = \frac{1}{1+1.97Bo^{1.3}} \quad (11)$$

- **Análisis de la velocidad normal de una burbuja generada desde un diámetro ϕ 0.3 mm en dirección ascendente**

La velocidad normal está relacionado con el diámetro equivalente, mediante un cálculo de las distancias de los ejes los cuales se muestran en la *Figura 70*, estas medidas se obtuvo aplicando una calibración que está a una escala de 0.028 mm/pix, haciendo un cálculo por la ecuación (8) propuestas por Clift et al. (1978) así se consigue el diámetro de la burbuja real, en esta sección se usó las imágenes obtenidas con la cámara de alta velocidad con una resolución de 1280 x 800, a una velocidad de 5000 c/s.

- **GRUPO I** : Flujo volumétrico variable y presión constante

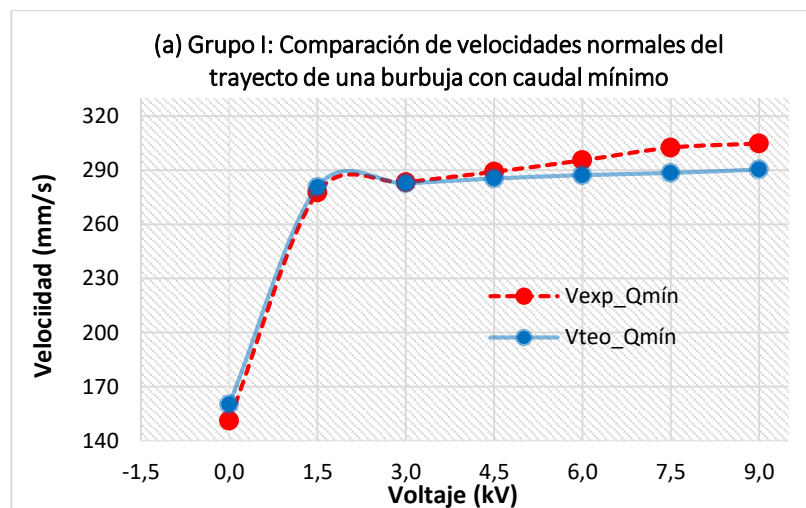
El procedimiento que se adopta para obtener los resultados de forma teórica de la velocidad normal, es primeramente calcular el número de Bond el mismo que debe relacionarse con el diámetro equivalente, según Tomiyama et al. (2002) hay que utilizar la ecuación (6) la que debe cumplir la moción $Bo < 40$, también las correlaciones de Okawa et al. (2003) y Wellek et al. (1966) estas son adaptas para fluidos puros y contaminados, los cuales deben cumplir la condición $Bo < 1$. Por lo tanto en la *Tabla 35* se muestra los valores del número de Bond en los diferentes ensayos que están en un intervalo de $0.33 < Bo < 0.61$, entonces si cumple la cláusula $Bo < 1$ definido esto se procede a calcular la velocidad teórica.

Tabla 35

Número de Bond para el grupo I

GRUPO I	Número de Bond						
	0,0 kV	1,5 kV	3,0 kV	4,5 kV	6,0 kV	7,5 kV	9,0 kV
Bo1	0,42	0,61	0,59	0,55	0,52	0,50	0,46
Bo2	0,47	0,44	0,41	0,39	0,36	0,33	0,40
Bo3	0,47	0,47	0,47	0,45	0,42	0,38	0,33

La interpretación de los diagramas mostrados en la *Figura 79*, están basados en los datos de la velocidad experimental y el resultado del cálculo de la velocidad teórica, donde se utilizó la ecuación (6). Esto ocurre cuando se aplica un campo eléctrico en la superficie de la burbuja.



CONTINÚA →

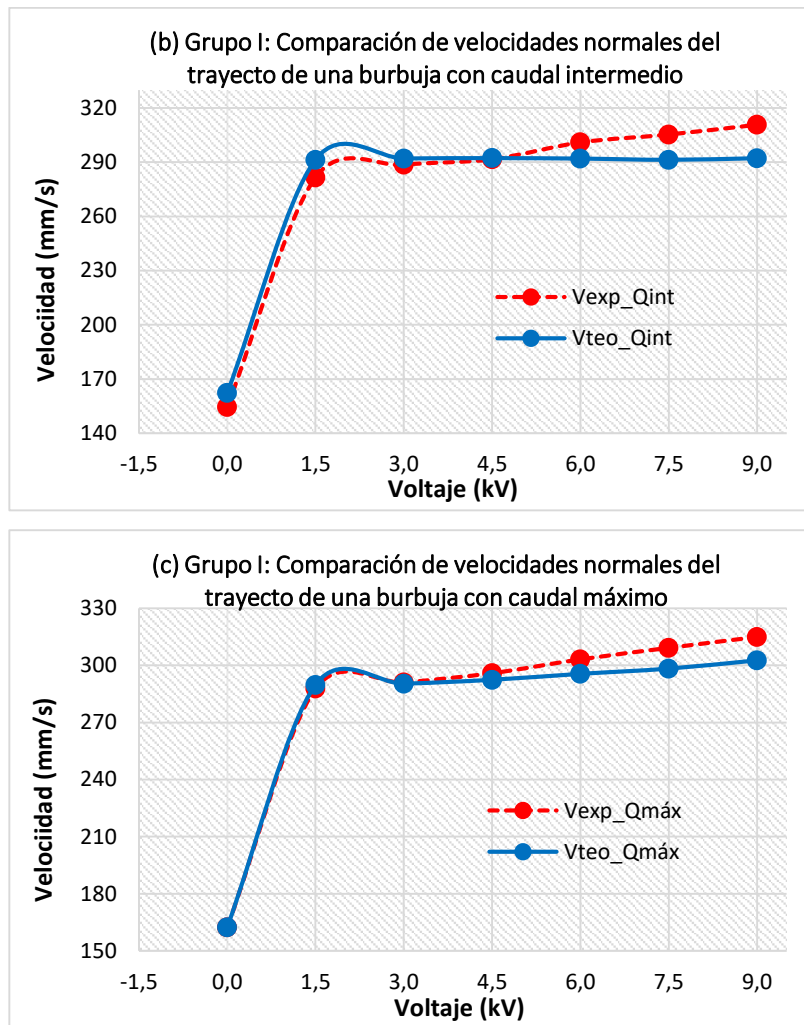


Figura 79. Comparación de velocidad experimental y teórica, del GRUPO I

Para un diámetro de boquilla de ϕ 0.3 mm, la fluctuación periódica de la burbuja, permitió el aumento de la velocidad experimental. Esto ocurre en la variación del caudal de gas de entrada de 0.15 lpm a 0.45 lpm tal como se indica en la *Figura 79a-c*.

Finalmente, se puede observar que el aumento de la velocidad experimental en diámetros muy pequeños, los valores son muy bajos y que están por debajo del 5.6%, esto sucede por la incertidumbre experimental la interpretación de varios casos se muestra en la *Tabla 36*.

Tabla 36

Grupo I: comparación de velocidad experimental y teórica por errores

GRUPO I	Condiciones		Regiones de velocidad normal (mm/s)				Error (%)	Caso
	Diámetro (mm)	Caudal (lpm)	Experimental		Teórica			
			Inicio	Final	Inicio	Final		
Ensayo I	0,30	0,15	151,17	304,92	160,62	290,48	-5.0% a 5.6%	Figura 79a
Ensayo II	0,30	0,30	154,53	310,64	162,32	292,15	-6.3% a 4.8%	Figura 79b
Ensayo III	0,30	0,45	162,27	315,01	162,33	302,63	-4.1% a 0.0%	Figura 79c

- **GRUPO II:** Presión variable y Flujo volumétrico constante

Para analizar los sucesos de este grupo es necesario hacer el cálculo del número adimensional Bond, el cual se estima desde el diámetro equivalente. Investigadores propusieron varias ecuaciones para obtener la velocidad experimental las cuales debes cumplir la índole de $Bo < 1$ entonces en la *Tabla 37* se muestras valores conseguidos en estos ensayos, el rango adquirido es de $0.20 < Bo < 0.77$ entonces constatando resultados este cumple con las correlaciones de la velocidad.

Tabla 37

Número de Bond para el grupo II

GRUPO II	Número de Bond						
	0,0 kV	1,5 kV	3,0 kV	4,5 kV	6,0 kV	7,5 kV	9,0 kV
Bo1	0,30	0,54	0,54	0,41	0,45	0,41	0,39
Bo2	0,20	0,47	0,49	0,56	0,63	0,56	0,52
Bo3	0,77	0,76	0,71	0,61	0,60	0,59	0,56

A continuación, se representa los resultados de las comparaciones entre velocidad experimental y velocidad teórica obtenida a través de la condición de número de Bond, estos casos se muestran en la *Figura 80*.

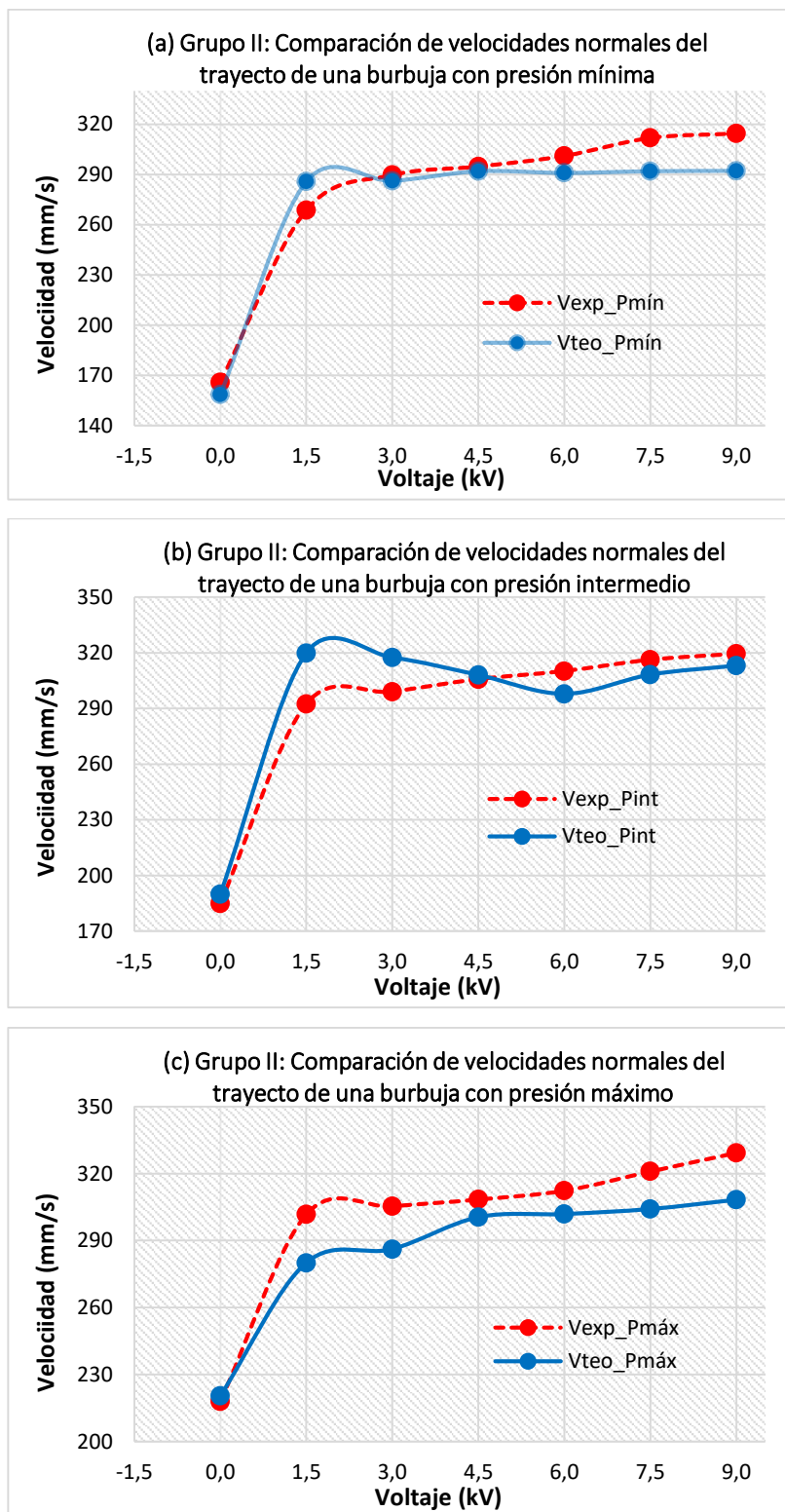


Figura 80. Comparación de velocidad experimental y teórica, del GRUPO II

En la *Figura 80a-c*, se percibe que existe incrementos de la velocidad experimental con un diámetro de boquilla de ϕ 0.3 mm, por lo tanto, la velocidad teórica está por debajo del 8.6% de error, sucede ese cambio brusco por una tasa alta de error la que es proporcionada por la incertidumbre en el cálculo del diámetro equivalente de la burbuja, varios casos están descritos más específicamente en la *Tabla 38*.

Tabla 38

Grupo II: comparación de velocidad experimental y teórica por errores

GRUPO II	Condiciones		Regiones de velocidad normal (mm/s)				Error (%)	Caso
	Diámetro (mm)	Presión (psi)	Experimental		Teórica			
			Inicio	Final	Inicio	Final		
Ensayo I	0,30	500	165,7	314,54	158,48	292,21	-7.6% a 6.0%	Figura 80a
Ensayo II	0,30	1500	184,87	319,59	190,03	313,17	-4.1% a 8.6%	Figura 80b
Ensayo III	0,30	2200	217,9	329,26	220,44	308,22	-7.7% a 1.2%	Figura 80c

- **Análisis de la velocidad normal de una burbuja generada desde un diámetro ϕ 0.5 mm en dirección ascendente**

En esta sección se utilizará imágenes obtenidas en formato de escala de grises con una resolución de 1280 x 800, a una velocidad de 5000 c/s, en la cual se obtuvo los valores de las distancias de sus dos ejes principales de la burbuja, estas medidas se obtuvieron aplicando también una escala de 0.028 mm/pix.

- **GRUPO III: Flujo volumétrico variable y presión constante**

Se utiliza el número Bond para definir las correlaciones propuestas por los investigadores la que nos permite validar las ecuaciones para el cálculo de la velocidad teórica, esta debe cumplir la índole de $Bo < 1$, en la *Tabla 39* se observan los valores obtenido para cada ensayo y carga eléctrica diferente. A la vez podemos concluir que el

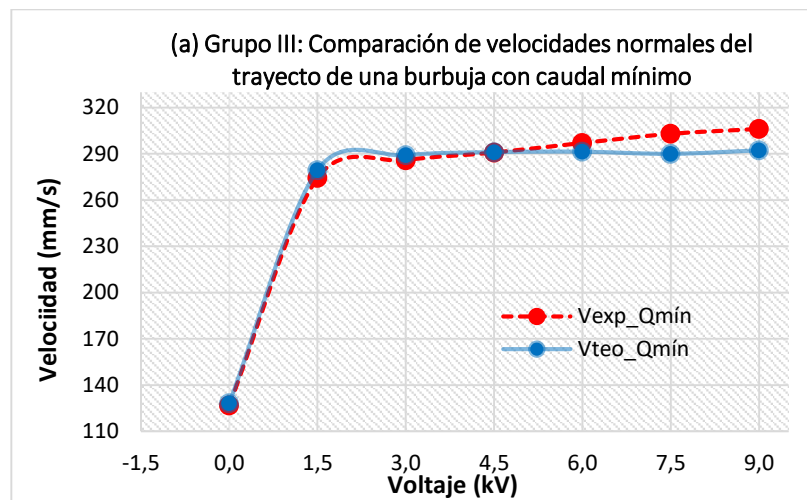
número de Bond están en un rango comprendido entre $0.07 < Bo < 0.49$, el cual si cumple la condición de trabajo.

Tabla 39

Número de Bond para el grupo III

GRUPO	Número de Bond						
	0,0 kV	1,5 kV	3,0 kV	4,5 kV	6,0 kV	7,5 kV	9,0 kV
Bo1	0,07	0,23	0,49	0,33	0,44	0,47	0,39
Bo2	0,24	0,26	0,40	0,45	0,36	0,33	0,37
Bo3	0,32	0,42	0,36	0,41	0,40	0,40	0,40

En la *Figura 81*, se representa la comparación entre velocidad experimental y teórica, cuando existe un flujo volumétrico variable y presión constante.



CONTINÚA →

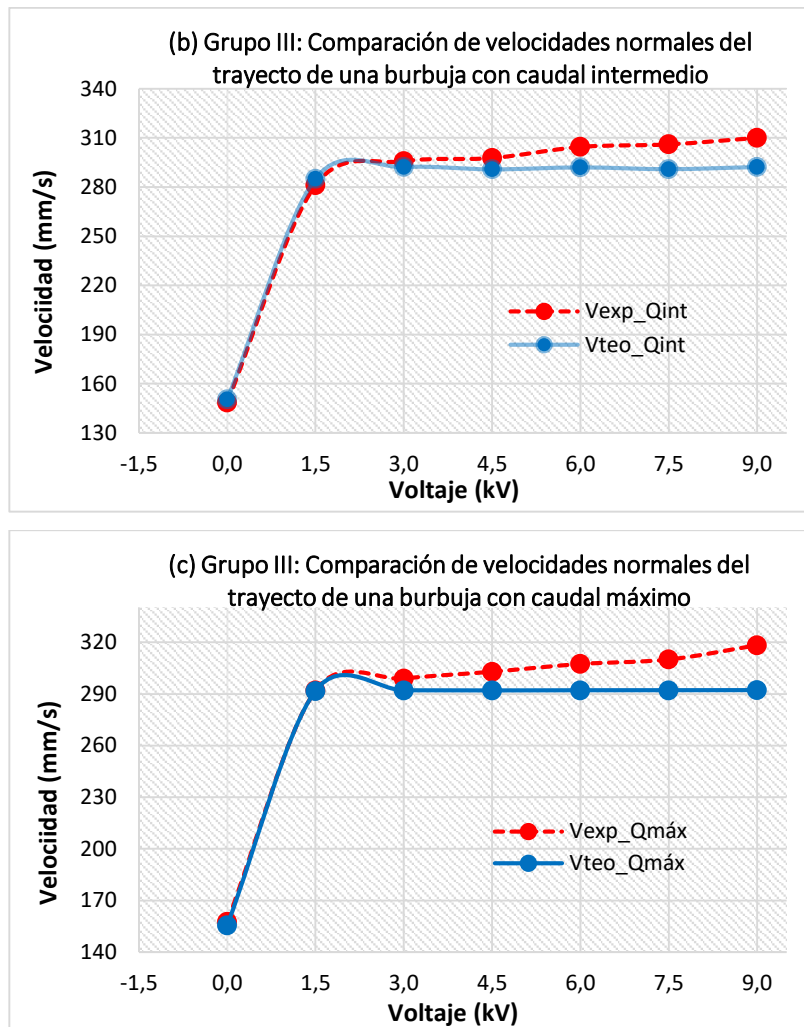


Figura 81. Comparación de velocidad experimental y teórica, del GRUPO III

Para burbujas más grandes, la velocidad disminuye monótonamente al aumentar la fuerza del campo eléctrico, tal como que se muestra en la *Figura 81a-c*, de tal manera que la velocidad teórica está por debajo del 1.8% de error, esto concluye que los valores de la velocidad teórica están en la región de la velocidad experimental, todos los casos están representados en la *Tabla 40*.

Tabla 40

Grupo III: comparación de velocidad experimental y teórica por errores

GRUPO III	Condiciones		Regiones de velocidad normal (mm/s)				Error (%)	Caso
	Diámetro (mm)	Presión (psi)	Experimental		Teórica			
			Inicio	Final	Inicio	Final		
Ensayo I	0,50	0,15	126,75	306,17	128,12	292,23	-4.8% a 1.8%	Figura 81a
Ensayo II	0,50	0,30	148,38	309,94	150,31	292,19	-6.1% a 1.4%	Figura 81b
Ensayo III	0,50	0,45	157,61	318,28	155,56	292,18	-8.9% a - 0.1%	Figura 81c

- **GRUPO IV:** Presión variable y Flujo volumétrico constante

Es importante definir el valor del número Bond para cada uno de los ensayos, con esta consideración se puede aplicar las ecuaciones y correlaciones propuestas por los diferentes investigadores para calcular teóricamente la velocidad de la burbuja, esta debe cumplir la condición de $Bo < 1$, los valores obtenidos se indican en la *Tabla 41*, estos datos de forma general están en el intervalo de $0.24 < Bo < 0.51$, los cuales cumplen con la condición propuesta.

Tabla 41

Número de Bond para el grupo IV

GRUPO IV	Número de Bond						
	0,0 kV	1,5 kV	3,0 kV	4,5 kV	6,0 kV	7,5 kV	9,0 kV
Bo1	0,24	0,26	0,46	0,44	0,62	0,40	0,43
Bo2	0,29	0,48	0,51	0,37	0,35	0,46	0,45
Bo3	0,31	0,41	0,34	0,40	0,37	0,38	0,37

Basándose en la ecuación de velocidad, se obtuvo las curvas de velocidad experimental y teórica, estos diagramas se indican en la *Figura 82*.

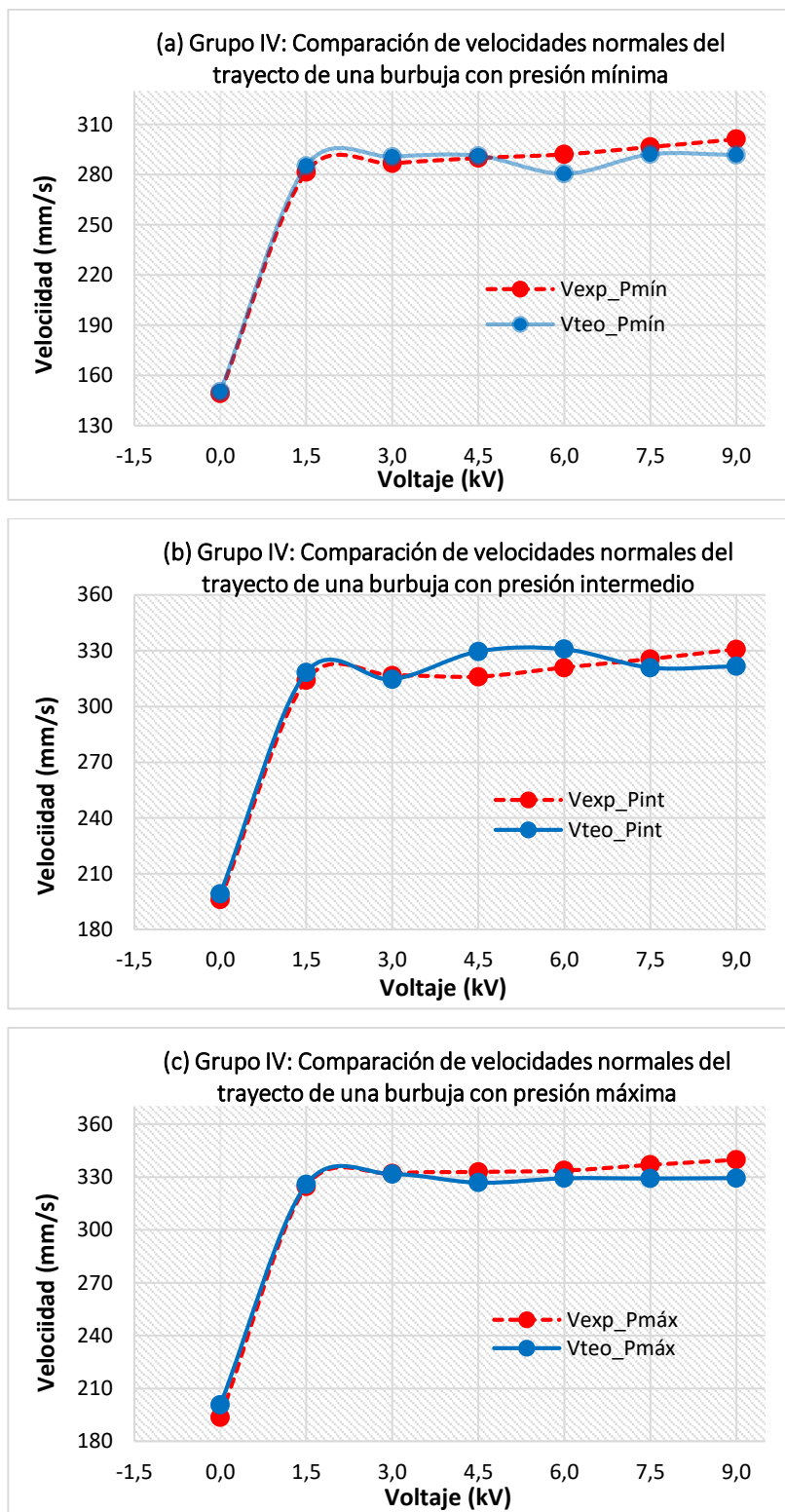


Figura 82. Comparación de velocidad experimental y teórica, del GRUPO IV

Al utilizar un diámetro de boquilla de ϕ 0.5 mm, las burbujas son más grandes y la velocidad incremento momentáneamente al aumentar energía. En la *Tabla 42* se presentan los casos que están relacionados con la *Figura 82a* y *Figura 82c*, de tal forma que la velocidad teórica está por debajo del 3.5%, donde sus valores están en la región de la velocidad experimental.

Tabla 42

Grupo IV: comparación de velocidad experimental y teórica por errores

GRUPO IV	Condiciones		Regiones de velocidad normal (mm/s)				Error (%)	Caso
	Diámetro (mm)	Presión (psi)	Experimental		Teórica			
			Inicio	Final	Inicio	Final		
Ensayo I	0,50	500	149,23	301,11	150,22	291,69	-4.2% a 1.4%	Figura 82a
Ensayo II	0,50	1500	196,15	330,74	199,24	321,61	-2.8% a 4.1%	Figura 82b
Ensayo III	0,50	2200	193,62	339,79	200,68	329,37	-3.2% a 3.5%	Figura 82c

5.2.6 Fuerzas de equilibrio sobre una burbuja

Las fuerzas que actúan principalmente sobre la superficie de una burbuja cuando está en dirección ascendente están declaradas en las ecuaciones (2), (3) y (4) dadas por Wang et al. (2017) expresadas anteriormente en una sección del capítulo II. Estas fuerzas se encuentran clasificadas en dos etapas diferentes: una primera etapa es cuando no existe la influencia del campo eléctrico, por lo tanto, el crecimiento de la burbuja es controlado por fuerzas de sobrepresión interna y la tensión superficial, la segunda etapa cuando se aplica un campo eléctrico y cumple la condición del número adimensional de Bond $B_o < 1$, las fuerzas que gobiernan el balance rige por la fuerza de flotación y la tensión superficial.

- **Boquilla con diámetro ϕ 0.3 mm**

Las interpretaciones de las fuerzas fueron proporcionadas por las características de la burbuja que se indican en la *Figura 70*, las distancias del eje mayor y menor, fueron

primordiales para encontrar las fuerzas que distorsionan a la burbuja en un campo eléctrico, estas se indican en la *Tabla 43* y *Tabla 44*, donde se puede apreciar que los valores tienden a acercarse al valor cero porque sus unidades están en μN .

- **GRUPO I:** Flujo volumétrico variable y presión constante

Tabla 43

Fuerzas de equilibrio para las burbujas del grupo I con ϕ 0.3 mm

GRUPO I		Voltaje aplicado						
		0,0 kV	1,5 kV	3,0 kV	4,5 kV	6,0 kV	7,5 kV	9,0 kV
Ensayo I	Fb (μN)	28,13	49,70	46,64	42,31	39,06	36,72	32,61
	Fc (μN)	15,54	22,17	22,89	24,05	25,29	25,81	24,78
Ensayo II	Fb (μN)	33,74	30,30	27,39	25,70	22,14	20,15	26,25
	Fc (μN)	20,43	20,93	20,90	22,33	22,87	23,38	25,10
Ensayo III	Fb (μN)	33,77	33,97	33,60	31,81	28,50	24,58	19,49
	Fc (μN)	17,92	18,64	18,38	19,31	20,49	22,58	23,07

- **GRUPO II:** Presión variable y Flujo volumétrico constante

Tabla 44

Fuerzas de equilibrio para las burbujas del grupo II con: ϕ 0.3 mm

GRUPO II		Voltaje aplicado						
		0,0 kV	1,5 kV	3,0 kV	4,5 kV	6,0 kV	7,5 kV	9,0 kV
Ensayo I	Fb (μN)	24,22	41,86	41,06	27,57	31,28	27,41	25,50
	Fc (μN)	20,96	26,22	26,41	22,84	22,16	21,14	20,72
Ensayo II	Fb (μN)	9,17	33,08	35,25	43,21	52,02	43,07	38,93
	Fc (μN)	15,98	25,94	27,04	29,55	32,20	26,09	25,01
Ensayo III	Fb (μN)	70,90	68,80	62,82	49,81	48,62	46,68	43,13
	Fc (μN)	19,94	20,50	19,26	17,41	17,87	17,73	21,02

- **Boquilla con diámetro ϕ 0.5 mm:**

Las fuerzas que actúan en un campo eléctrico, se obtuvieron por medio de las distancias del eje menor y mayor de una burbuja, a continuación, en las *Tabla 45* y *Tabla 46*, se puede apreciar los datos teóricos del experimento, donde se aprecia que estas fuerzas de flotabilidad y capilaridad se aproximan cada vez más al valor cero. Asimismo, las propiedades físicas de los fluidos se adquirieron de las *Tabla 8* y *Tabla 9*.

- **GRUPO III:** Flujo volumétrico variable y presión constante

Tabla 45.

Fuerzas de equilibrio para las burbujas del grupo III con: ϕ 0.5 mm

GRUPO III		Voltaje aplicado						
		0,0 kV	1,5 kV	3,0 kV	4,5 kV	6,0 kV	7,5 kV	9,0 kV
Ensayo I	Fb (μ N)	1,75	11,16	35,88	19,73	30,16	33,84	24,97
	Fc (μ N)	4,66	10,96	17,64	15,71	20,00	21,31	23,37
Ensayo II	Fb (μ N)	12,07	13,78	26,18	31,86	22,20	19,40	23,77
	Fc (μ N)	9,80	11,67	18,42	23,67	21,87	20,42	21,71
Ensayo III	Fb (μ N)	18,87	28,53	22,84	27,28	26,59	26,33	25,91
	Fc (μ N)	19,09	20,98	21,49	24,16	23,18	22,82	21,74

- **GRUPO IV:** Presión variable y Flujo volumétrico constante

Tabla 46

Fuerzas de equilibrio para las burbujas del grupo IV con: ϕ 0.5 mm

GRUPO IV		Voltaje aplicado						
		0,0 kV	1,5 kV	3,0 kV	4,5 kV	6,0 kV	7,5 kV	9,0 kV
Ensayo I	Fb (μ N)	11,99	13,87	32,23	30,63	50,30	26,81	28,89
	Fc (μ N)	14,94	16,17	23,49	25,91	31,49	20,75	24,64
Ensayo II	Fb (μ N)	16,58	34,50	37,74	23,44	21,74	32,27	31,59
	Fc (μ N)	20,61	26,75	28,20	22,60	22,13	25,51	25,43
Ensayo III	Fb (μ N)	18,20	27,71	20,38	26,62	23,85	23,96	23,70
	Fc (μ N)	19,05	22,34	20,75	25,19	22,29	22,97	22,51

5.2.7 Análisis de la Influencia del campo eléctrico

Cuando se interpone el efecto del campo eléctrico en el proceso del crecimiento de la burbuja, se debe efectuar un análisis más a fondo de los cálculos de los esfuerzos eléctricos en la superficie de la burbuja al momento de su efugio, estos deben ser interpretados en función del ángulo, en la *Figura 83* se observar una representación de como interactúa una zona eléctrica con el contorno de la burbuja.

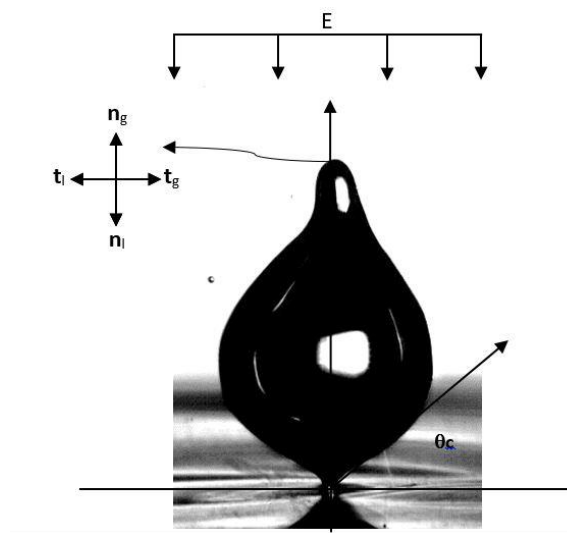


Figura 83. Esfuerzos eléctricos en una burbuja

- **Fuerza eléctrica sobre la burbuja**

El efecto de los esfuerzos eléctricos cuando existen altas tasas de inyecciones de nitrógeno se muestra en la *Figura 83*, la fuerza eléctrica puede ser expresada por la ecuación (5), esta actúa en cada punto de la superficie de la burbuja de tal manera que se divide en componentes normales y tangenciales. Las tres principales tensiones que intervienen en el contorno de la burbuja son la tensión dielectroforesis, T_{DEP} , la tensión de electrostricción, T_{STR} , y la tensión electrohidrodinámica, T_{EHD} , estas tensiones se encuentran expresados en función del ángulo.

- **Tensiones eléctricas en el contorno de la burbuja**

Las tensiones eléctricas elementales que intervienen sobre la interfaz del nitrógeno y la superficie del agua. Se catalogan en tres tipos: tensión dielectroforesis, tensión electrostricción y tensión electrohidrodinámica, estas son expresadas por Chen et al. (2007) en las ecuaciones (11), (12) y (13) respectivamente.

$$T_{DEP} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_g^2 \varepsilon_g - E_l^2 \varepsilon_l) n_l \quad (12)$$

$$T_{STR} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_l^2 \left[\frac{(\varepsilon_l - 1)(\varepsilon_l + 2)}{3} \right] n_l \quad (13)$$

$$T_{EHD} = -\frac{\varepsilon_0 (\varepsilon_l - 1)^2}{6} (2E_{ln}^2 - E_{lt}^2) n_l \quad (14)$$

Dónde: ε_0 es la permitividad del vacío, ε_g es la permitividad del gas, ε_l es la permitividad del líquido, E_g es la fuerza eléctrica del gas, E_l es la fuerza eléctrica del líquido, E_{ln} es la fuerza eléctrica del líquido en la normal y E_{lt} es la fuerza eléctrica del líquido tangencial. A continuación se expresara los diferentes parámetros de las tensiones eléctricas en función del ángulo: $E_g^2, E_l^2, (E_{ln}^2 - E_{lt}^2)$, los cuales según Zaghdoudi & Lallemand (2000) propone las ecuaciones (14), (15) y (16), también en la ecuación (17) podemos observar el valor de E_0^2 .

$$E_l^2 = \frac{9E_0^2}{(2+X)^2} [X^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta] \quad (15)$$

$$E_g^2 = \frac{9E_0^2}{(2+X)^2} \quad (16)$$

$$E_{ln}^2 - E_{lt}^2 = \frac{9E_0^2}{(2+X)^2} X^2 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \quad (17)$$

$$E_0^2 = \frac{U}{d_{(eje)}} ; n_l = -n_g \quad (18)$$

Dónde: E_0 es la fuerza inicial eléctrica del campo eléctrico. Entonces analizando la importancia de las tensiones eléctricas, hay que tener en consideración que cuando se

trata de un fluido incompresible en esta ocasión el agua, esta tensión de electrostricción se debe omitir. Mientras tanto que en los diagramas de todo el conjunto de grupos se representara el comportamiento de la tensión de electrostricción para percibir cual es la consecuencia con la burbuja.

Al utilizar las ecuaciones propuestas por los investigadores, se desarrolló un cálculo el cual nos permite conocer el comportamiento de los esfuerzos que se produce cuando se aplica un campo eléctrico, por lo tanto, en la *Figura 84*, se muestra las curvas representativas de los grupos experimentales.

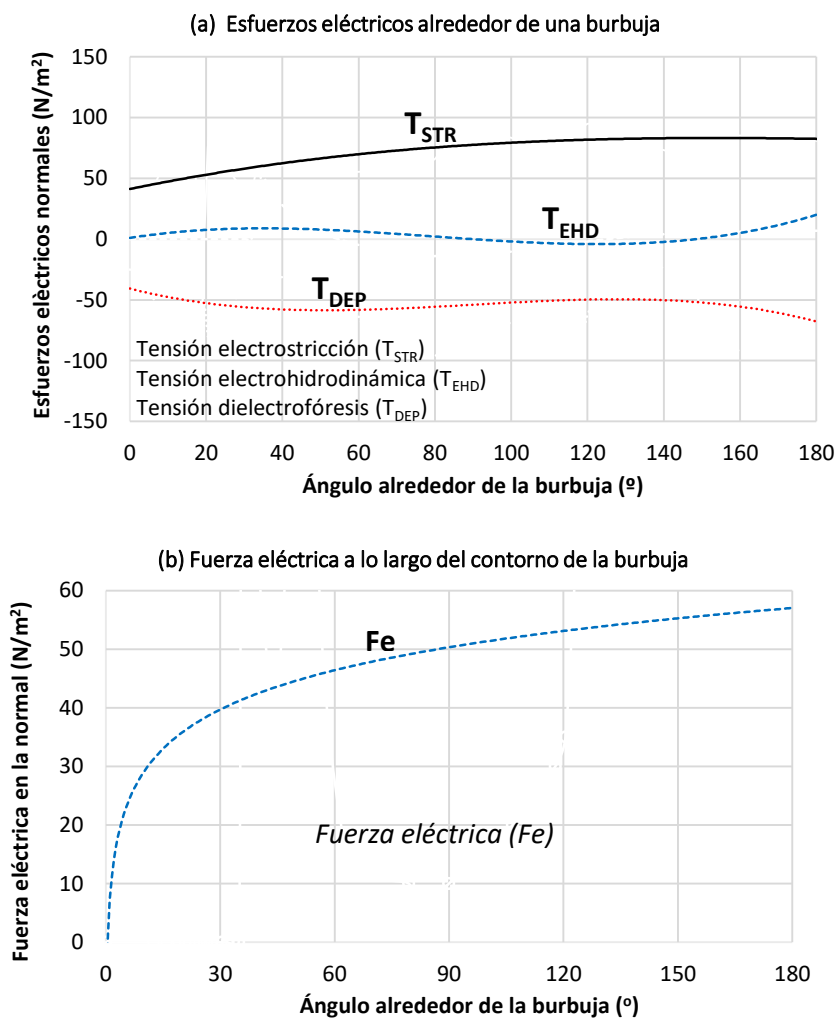


Figura 84. Comportamiento de los esfuerzos eléctricos y fuerza eléctrica a 9.0 kV

Los esfuerzos predominantes a lo largo de la superficie de la burbuja se indican en la *Figura 84a-b*, esto se obtuvo cuando el voltaje inicial era de 9.0 kV.

Los esfuerzos eléctricos distorsionan al área de la burbuja, los tipos de tensiones que producen efectos en el contorno de la burbuja son la tensión de electrostricción, T_{STR} , el cual le permite comprimir a la burbuja y la tensión de dielectroforesis, T_{DEP} , le permite expandir a lo largo de la superficie de la burbuja, esto ocurre a un ángulo máximo del alrededor de la burbuja, asimismo se tiene que las regiones de los esfuerzos de expansión ejercidos sobre la superficie de la burbuja también son mucho más pequeñas que las de los esfuerzos de compresión.

También la tensión electrohidrodinámica, T_{EHD} , permite que la burbuja sea más esbelta en el campo eléctrico. Por lo tanto, para los grupos experimentales que tienes condiciones específicas se representó en la *Tabla 47*, donde los esfuerzos están representados por el voltaje máximo a 9.0 kV.

Tabla 47

Tipos de esfuerzos del campo eléctrico de los grupos experimentales

GRUPOS EXPERIMENTALES		Condiciones				Tipos de esfuerzos				
		Diámetro (mm)	Caudal (lpm)	Presión (psi)	Voltaje (kV)	$T_{(STR)}$ (N/m ²)	$T_{(DEP)}$ (N/m ²)	$T_{(EHD)}$ (N/m ²)	Fe (N/m ²)	Ángulo
GRUPO I	Ensayo I	0,30	0,15	2200	9,0	74,91	-77,76	21,72	18,87	131,63°
	Ensayo II	0,30	0,30	2200	9,0	63,48	-65,60	40,23	38,10	136,80°
	Ensayo III	0,30	0,45	2200	9,0	42,57	-43,23	84,80	84,15	147,65°
GRUPO II	Ensayo I	0,30	0,30	500	9,0	34,35	-35,41	28,25	27,19	138,99°
	Ensayo II	0,30	0,30	1500	9,0	26,35	-27,10	26,78	26,04	140,92°
	Ensayo III	0,30	0,30	2200	9,0	10,11	-10,26	20,66	20,51	147,91°
GRUPO III	Ensayo I	0,50	0,15	2200	9,0	36,20	-37,43	21,89	20,66	136,43°
	Ensayo II	0,50	0,30	2200	9,0	32,24	-33,15	33,30	20,98	141,07°
	Ensayo III	0,50	0,45	2200	9,0	25,43	-26,00	36,91	36,34	144,41°

CONTINÚA 

GRUPO IV	Ensayo I	0,50	0,30	500	9,0	34,60	-35,74	23,72	22,58	137,44°
	Ensayo II	0,50	0,30	1500	9,0	22,58	-23,09	32,91	32,40	144,45°
	Ensayo III	0,50	0,30	2200	9,0	23,26	-23,84	37,80	37,32	145,51°

La fuerza eléctrica empieza a incrementar constantemente tal como muestra en la *Figura 84b*, cuando aumenta el voltaje del campo eléctrico, este tiene el efecto de deformar a la burbuja en todo su contorno. En la *Tabla 47* se puede apreciar los valores que se obtuvo para un voltaje máximo.

5.2.8 Comparación de burbujas por un diámetro de ϕ : 0.3 mm y ϕ :0.5 mm

Posteriormente en esta sección se analizará los sucesos que ocurrieron en cada uno de los aspectos experimentados o evaluados considerados durante cada uno de los ensayos mencionados en cada uno de los grupos, los cuales están representados en *Tabla 48* las observaciones más relevantes.

Tabla 48

Clasificación de aspectos de la burbuja según su diámetro de boquilla

COMPARACIONES SEGÚN EL DIAMETRO DE BOQUILLA		
Aspectos de la burbuja	Diámetro de boquilla ϕ : 0,3 mm	Diámetro de boquilla ϕ : 0,5 mm
DESPRENDIMIENTO (0.30 lpm – 2200psi)	Para diferenciar el comportamiento de la burbuja se aplicará la relación de aspecto esto depende de las dimensiones obtenidas en los ejes de la burbuja, donde para el GRUPO I existe un aumento del 4% y el GRUPO II se incrementa en un 14%.	Para la burbuja de diámetro mayor, su relación de aspecto incrementa en el GRUPO III en un porcentaje de 9.9% que es alrededor del doble esto sucede cuando se experimenta a condiciones de flujo volumétrico variable y presión constante, mientras que para el GRUPO IV su relación de aspecto aumenta a 10.2% y en comparación con el GRUPO II este disminuye.

CONTINÚA 

<p>EVOLUCIÓN</p>	<p>El cuello de la burbuja de un diámetro pequeño no es muy pronunciado, tal como se indica en la <i>Figura 71</i> este se engendra a un tiempo de 0.0112 ± 0.0001 s, esto sucede cuando existe una presión mínima de 500 psi</p>	<p>Al tener una burbuja de mayor diámetro y tener la moción de trabajo específicamente con tasas muy elevadas en la presión estas no permiten definir bien el cuello de la burbuja solo nos muestra un alargamiento</p>
<p>VELOCIDAD (0.30 lpm – 2200psi)</p>	<p>La velocidad de una burbuja pequeña, para el GRUPO I tiene un error máximo de 4.8% y para el GRUPO II el error máximo es 1.2%.</p>	<p>Mientras que para una burbuja de mayor dimensión se tiene en el GRUPO III el error de 1.4 % y en el GRUPO IV presenta un error del 3.5%.</p>
<p>FUERZAS DE EQUILIBRIO (0.30 lpm – 2200psi)</p>	<p>A medida que el diámetro de la burbuja es más diminuto, las fuerzas que permiten el equilibrio no son tan pequeñas, pero se acercan a cero por que están en unidades de μN.</p>	<p>Según los resultados obtenidos que están representados en las <i>Tabla 41</i> y <i>Tabla 42</i>, las fuerzas que permiten el equilibrio de la burbuja como la fuerza de flotación y la de capilaridad, éstas ejercen menor fuerza</p>
<p>INFLUENCIA DEL CAMPO ELÉCTRICO (0.30 lpm – 2200psi)</p>	<p>Los esfuerzos eléctricos proporcionados para una burbuja generada por un diámetro menor es aproximadamente el doble que se necesita para una burbuja de diámetro mayor, estos valores se observar en la <i>Tabla 43</i></p>	<p>Mientras tanto la fuerza eléctrica para un diámetro mayor de burbuja su fuerza es mucho menor, para la burbuja de diámetro menor se requiere más fuerza.</p>
<p>VISUAL</p>	<p>La burbuja de diámetro pequeño es de forma uniforme al momento que asciende cuando interactúa con el campo eléctrico a diversas mociones de trabajo</p>	<p>Al ser una burbuja de diámetro mayor esta cuando asciende, a una determinada altura se desprenden burbujas más diminutas cuando la presión no es constante</p>

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se diseñó y construyó un reactor de burbujas para evaluar la influencia de un campo eléctrico uniforme en un flujo multifásico, el mismo que será implementado en el Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, para realizar el estudio del comportamiento de una burbuja cuando tiene deformaciones por las fuerzas que actúan en la superficie del fluido.
- Se definió las principales variables y parámetros específicos experimentales, para cada tipo de ensayos de cada de uno de los grupos, los cuales serán mencionados a continuación:

PARAMETROS	VARIABLES
Caudal	Relación de aspecto
Presión	Diámetro equivalente
Voltaje	Velocidad
Diámetro de boquilla	Número de Bond
	Fuerza de flotabilidad
	Fuerza capilar
	Esfuerzos eléctricos
	Fuerza eléctrica

- Para validar los resultados de velocidades obtenidos experimentalmente se utilizó la ecuación propuesta por Tomiyama et al. (2002), se aplicó este modelo por ser la que proporcionaba menor incertidumbre de error en la velocidad teórica de la burbuja de nitrógeno cuando interactuaba con un fluido líquido “agua”.

$$V_T = \frac{\sin^{-1} \sqrt{1-E^2} - E\sqrt{1-E^2}}{1-E^2} \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho_l d_e} E^{\frac{4}{3}} + \frac{\Delta\rho g d_e}{2\rho_l} \frac{E^{\frac{2}{3}}}{1-E^2}}$$

En este modelo para poder caracterizar la forma de una burbuja es necesario aplicar el número adimensional Bond, este se relaciona dependiendo de la pureza del fluido líquido, existen dos tipos de correlaciones propuestas según la condición del fluido de trabajo:

$$E = \frac{1}{1+0.163Bo^{0.757}} \quad \text{para líquidos puros}$$

$$E = \frac{1}{1+1.97Bo^{1.3}} \quad \text{para líquidos contaminados}$$

- Se evaluó la velocidad para fluidos puros y contaminados, donde se calculó el número de Bond empleando la moción de $Bo < 1$, en los cuatros grupos experimentales este número está en un intervalo desde $0.07 < Bo < 0.77$ por ende a lo largo de la trayectoria del campo eléctrico la velocidad normal incrementa.

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES	
Teórica vs Experimental	
GRUPO I	± 6.3 %
GRUPO III	± 8.6 %
GRUPO III	± 8.9 %
GRUPO IV	± 4.2 %

Estos errores porcentuales se obtuvieron por la incertidumbre alta que existe en las imágenes de las burbujas.

- Para la evaluación de las fuerzas inducidas por un campo eléctrico, se consideró que en todos los grupos experimentales cumplió la moción de $Bo < 1$, esto nos permite esclarecer que las fuerzas que mandan sobre la burbuja es: la fuerza de

flotación, F_b , y la fuerza capilar, F_c , los valores obtenidos de estas fuerzas en los cuatro grupos de experimentos con diferentes condiciones de trabajo, están muy cercano a cero y están expresados en unidades de μN .

- Los diferentes tipos de esfuerzos eléctricos se evaluaron para identificar la deformación existente en las burbujas generadas con diámetros de boquilla de: ϕ 0.3 mm y diámetro de boquilla de: ϕ 0.5 mm, como consecuencia del cálculo pertinente se obtuvo que: la tensión de electrostricción (T_{STR}) permite la compresión de la burbuja, la tensión dielectroforesis (T_{DEP}) permite expandir la burbuja en toda su superficie y la tensión electrohidrodinámica (T_{EHD}) permiten que la burbuja sea esbelta cuando existe incremento de voltaje.
- El desprendimiento de burbujas se produce cuando las fuerzas que actúan en la zona eléctrica entran en equilibrio, por lo tanto, cuando se forman burbujas desde un diámetro de boquilla de: ϕ 0.3 mm y ϕ 0.5 mm, se consideró que la relación de aspecto promedio, AR_{prom} para los grupos de ensayos son los indicados a continuación:

	Boquilla	Caudal	Presión	AR_{prom}
GRUPO I	ϕ : 0,3 mm	Flujo volumétrico variable	Presión constante (2200 psi)	5%
GRUPO II	ϕ : 0,3 mm	Caudal constante (0,30 lpm)	Presión variable	11%
GRUPO III	ϕ : 0,5 mm	Flujo volumétrico variable	Presión constante (2200 psi)	14,30%
GRUPO IV	ϕ : 0,5 mm	Caudal constante (0,30 lpm)	Presión variable	14%

- Al utilizar un diámetro de boquilla de ϕ 0.3 mm, se pudo observar que en el contorno de la burbuja en la punta superior se genera una cresta muy pequeña, cuando se usa un diámetro de boquilla de ϕ 0.5 mm, se obtuvo en el contorno de

la burbuja en la parte superior se genera una cresta muy prolongada. Estos son producidos por valores altos de las condiciones experimentales de trabajo, en especial de la presión.

6.2 Recomendaciones

- Para el ensamblaje e implementación del prototipo del reactor de burbujas, se debe realizar una cuidadosa inspección en las conexiones eléctricas e hidráulicas, las cuales si ejercen algún tipo falla estas se verán reflejadas en la obtención de datos.
- Es necesario tener cuidado con la manipulación del equipo regulador de energía para no obtener datos erróneos en el proceso de experimentación, como también cuidar los lentes de la cámara de alta velocidad Phantom V2512 de toda suciedad.
- Utilizar un instrumento que permita regular con una alta gama de precisión la tasa de flujo volumétrico y sobre todo la presión.
- Realizar un estudio sobre el efecto que tendría en una burbuja en dirección ascendente cuando se aplica un campo eléctrico no uniforme.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Allen, P. H., & Karayiannis, T. G. (1994). Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer and fluid flow. *Heat Recovery Systems*, 35.
- Basu, D. K. (1973). Effect of electric field on boiling hysteresis in carbon tetrachloride. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 3.
- Besagnia, G., Inzoli, F., De Guido, G., & Pellegrini, L. A. (2017). The dual effect of viscosity on bubble column hydrodynamics. *Chemical Engineering Science*, 30.
- Bitter, F. (1964). *Corrientes, campos y partículas*. Reberte.
- Chen, F., Peng, Y., Song, Y., & Chen, M. (2007). EHD behavior of nitrogen bubbles in DC electric fields. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 8.
- Clavijo, D. A. (2002). *Fundamentos de química analítica*. Bogotá.
- Clift, R., Grace, J., & Weber, M. E. (1978). *Bubbles, Drops*. New York: Academic Press.
- Conesa, J. A. (2002). *Diseño de reactores heterogéneos*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Di Bari, S., & Robinson, A. J. (2013). Adiabatic bubble growth in uniform DC electric fields. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 10.
- Di Marco, P., Grassi, W., & Memoli, G. (2002). Experimental study on rising velocity of nitrogen bubbles in FC-72. *International Journal of Thermal Sciences*, 12.
- Di Marco, P., Grassi, W., Memoli, G., Takamasa, T., Tomiyama, A., & Hosokawa, S. (2003). Influence of electric field on single gas-bubble growth and detachment in microgravity. *International Journal of Multiphase Flow*, 20.
- Di Marco, P., Kurimoto, R., & Saccone, G. (2013). Bubble shape under the action of. *Therm. Fluid Sci.*, 9.
- Efremov, G. I., & Vakhrushev, I. A. (1968). Formation of bubbles of gas in different liquids. 7.
- Ehu. (Diciembre de 2017). <http://www.ehu.eus>. Obtenido de http://www.ehu.eus/rperez/Fisicabio/docs/densidad_visco.pdf
- FMS. (2017). <http://www.fms.pt>. Obtenido de http://www.fms.pt/es/cobre/tubos/tubo_capilar_cobre.html
- Fogler, H. S. (2001). *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*. Mexico: Pearson Educación.

- Gaddis, E. S., & Vogelpohl, A. (1985). Bubble formation in quiescent liquids under constant flow conditions. *Chemical Engineering Science*, 9.
- Gennes, P. G., Wyart, F., & Quere, D. (2004). *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves*. New York: Springer Science.
- Herman, C., Iacona, E., Földes, I. B., Suner, G., & Milburn, C. (2002). Experimental visualization of bubble formation from an orifice in microgravity in the presence of electric fields. *Experiments in fluids*, 17.
- Kang, C., Zhang, W., Gu, Y., & Mao, N. (2017). Bubble size and flow characteristics of bubbly flow downstream of a ventilated cylinder. *School of Energy and Power Engineering*, 10.
- Khurana, A. K., & Kumar, R. (1969). Studies in bubble formation - III. *Chemical Engineering Science*, 13.
- Kumar, R., & Kuloor, N. R. (1970). *The formation of bubble and drops*. Bangalore.
- Levenspiel, O. (2005). *ingeniería de la Reacciones Químicas*. Barcelona: Reverté.
- LINDE. (Noviembre de 2017). www.linde.es.
- Lozano, M., & Ortiz, G. (2016). *Reactores Químicos*.
- Mashelkar, R. A. (1970). Bubble Columns. *Brit. Chem. Eng.*, 15.
- Michaelides, & Efstathios, E. (2006). *Particles, Bubbles and Drops. Their Motion, Heat and Mass Transfer*. Singapore: World Scientific.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*. México.
- Ngachin, M. (2011). Simulation of Rising Bubbles Dynamics Using the Laplace Boltzmann Method. *FIU Electronic Teses and Dissertations*.
- Ogata, S., K., T., Nishijimal, K., & Chang, J. S. (1985). Development of Improved Bubble Disruption and Dispersion Technique by an Applied Electric Field Method. *Ind. Eng. Chem*, 8.
- Okawa T., T. T. (2003). Temperature effect on single bubble rise characteristics in stagnant distilled water. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 10.
- Pamperin, O., & Rath, H. J. (1995). Influence of buoyancy on bubble formation at submerged orifices. *Chemical Engineering Science*, 16.
- Park, Y., Tyler, A. L., & De Nevers, N. (1976). The chamber orifice interaction in the formation of bubbles. *Chemical Engineering Science*, 10.
- Proacero. (2017). <http://www.proacero.ec/productos>.

- Ramakrishnan, S., Kumar, R., & Kuloor, N. R. (1969). Studies in bubble formation - I: Bubble formation under constant flow conditions. *Chemical Engineering Science*, 17.
- Sámamo, G. D. (2011). Hidrodinámica entre dos burbujas en fluidos. México.
- Schlumberger. (Noviembre de 2017). <http://www.glossary.oilfield.slb.com>.
- Shah, Y. T., Kelkar, B. G., Gcdbole, S. P., & Deckner, W. D. (1982). Design parameters estimation of bubble column reactors. *AIChE Journal*, 27.
- Shaw, S. J., Spelt, P. D., & Matar, O. K. (2009). Electrically-induced bubble deformation, translation and collapse. *Journal of Engineering Mathematics*, 20.
- Shew, W. L., Poncet, S., & Pinton, J. F. (2006). Force measurements on rising bubbles. *J. Fluid Mech*, 10.
- Shoikhedbrod, M. (2017). The Gas Bubble Behavior under Surface Tension Change in Microgravity Conditions. *Fluid Mechanics*, 4.
- Spelt, P. D., & Matar, O. K. (2006). Collapse of a bubble in an electric field. *PHYSICAL REVIEW*, 11.
- Studocu. (Diciembre de 2017). <https://www.studocu.com>. Obtenido de https://www.studocu.com/es/document/universidad-de-la-laguna/instalaciones-de-la-edificacion-i/apuntes/tabla-de-propiedades-fisicas-del-agua/796243/view?has_flashcards=0
- SZG. (2017). <http://www.sggglassmanufacturer.com>.
- Terasaka, K., & Tsuge, H. (1993). Bubble formation under constant - flow conditions. *Chemical Engineering Science*, 6.
- Tomiyama A., C. G. (2002). Terminal velocity of single bubbles in surface tension. *International Journal of Multiphase Flow*, 23.
- Tridimake. (Noviembre de 2017). <http://www.tridimake.com>.
- Tsuge, H., Terasaka, K., & Koshida, W. (1997). Bubble formation at submerged nozzles for small gas flow rate under low gravity. *Chemical Engineering Science*, 6.
- Wang, H., Zhang, Z. Y., Yang, Y. M., & Zhang, H. S. (2010). Surface tension effects on the behaviour of a rising bubble. *Chin. Phys*, 9.
- Wang, H., Zhang, Z., Yang, Y., & Zhang, H. (2010). Viscosity effects on the behavior of a rising bubble. *Journal of hydrodynamics*, 9.

- Wang, Q., Zhang, G., Wang, C., Ma, R., & Yao, W. (2017). The electrically induced bubble behaviors considering different bubble injection directions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 14.
- Webbon, B. W., & Buyevich, Y. A. (1996). Bubble formation at a submerged orifice in reduced gravity. *Chemical Engineering Science*, 15.
- Wellek R.M., A. A. (1966). Shape of liquid. *AIChE Journal*, 8.
- Wilches, Z. M., Ruiz, M. L., & Hernández, V. M. (2014). *Bioingeniería VI*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Wraith, A. E. (1971). Two stage bubble growth at a submerged plate orifice. *Chemical Engineering Science*, 14.
- Zaghdoudi, M. C., & L. M. (2000). Study of the behaviour of a bubble in an electric field: steady shape and local fluid motion. *Int. J. Therm. Sci*, 39-52.

ANEXOS**A. Planos mecánicos****B. Tablas de datos****C. Parámetros específicos e variables**