

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN CRUDO-AGUA POR LA TÉCNICA DE FLOTACIÓN POR INYECCIÓN DE GAS.



CRISTIAN ANDRÉS MUÑOZ GALLARDO

**Universidad Del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Línea de Automatización y Control
Popayán, Enero de 2017**

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE SEPARACIÓN CRUDO-AGUA POR LA TÉCNICA DE FLOTACIÓN POR INYECCIÓN DE GAS.



CRISTIAN ANDRÉS MUÑOZ GALLARDO

**Monografía presentada como requisito para optar al título de
Ingeniero en Automática Industrial**

Director: Dr. Carlos Alberto Gaviria López

**Universidad Del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Línea de Automatización y Control
Popayán, Enero de 2017**

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación
por Inyección de Gas

Nota de Aceptación: _____

Firma del Jurado

Firma de Jurado

Popayán, Septiembre de 2016

AGRADECIMIENTOS

*A Dios.
Al ingeniero Carlos Gaviria.
A los ingenieros del departamento de
Electrónica, Instrumentación y Control de la facultad
De Ingeniería Electrónica.
A la universidad del Cauca
A mis padres familiares y amigos.*

Tabla de Contenido

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	13
INTRODUCCIÓN	14
CAPITULO 1	16
BASES CONCEPTUALES	16
1.1 ESTADO DEL ARTE DE LAS UNIDADES DE FLOTACIÓN POR INYECCIÓN DE GAS	18
1.1.1 Unidades de flotación tipo gas disuelto (DAF)	18
1.1.2 Unidades de flotación tipo gas inducido (IAF)	19
1.1.3 Flotación en columna	20
1.2 GENERADORES DE MICROBURBUJAS	21
1.2.1 Dispositivos para la Generación de Burbujas tipo DAF	21
1.2.2 Dispositivos para Generación de Burbujas tipo IAF	23
1.3 EL EYECTOR O DISPOSITIVOS VENTURI	26
1.3.1 Funcionamiento	26
1.3.2 Principios operativos de un generador de microburbujas.	27
1.3.3 Dimensiones estructurales de un eductor.....	30
1.4 ESTADO DEL ARTE SOBRE EDUCTORES	32
CAPITULO 2	34
FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ECOFLOT.	34
2.1 OBJETIVO DEL SISTEMA ECOFLOT.	35
2.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN.	35
2.2.1 Boquillas	37
2.2.2 Sistema de Inyección de Gas	38
2.2.3 Datos tamaños de burbujas	39
CAPITULO 3	40
FACTORES QUE INCIDEN EN LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN CRUDO/AGUA	40
3.1 GENERACIÓN DE MICRO-BURBUJAS MEDIANTE SISTEMA VENTURI 41	
3.1.1 Parámetros geométricos del generador	41
3.1.2 Factor fluido/físico dentro del generador.....	44
3.2 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE UN EDUCTOR	53

3.3 CONTACTO ADHERENCIA ENTRE LAS BURBUJAS DE GAS Y LA PARTÍCULA O GOTA DE ACEITE EN LA COLUMNA DE FLOTACIÓN.....	55
3.3.1 El proceso de adhesión.....	55
3.3.2 Velocidad Ascensional.....	57
3.3.3 Trayectorias de una Burbuja.....	57
3.3.4 El Proceso de Coalescencia de una Gota de Petróleo y la Burbuja. .	59
3.3.5 Tensión Superficial	60
3.3.6 Humectabilidad.....	60
3.3.7 Velocidad Terminal de una Burbuja	62
CAPITULO 4.....	65
PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE LAS BOQUILLAS EN EL SISTEMA ECOFLOT.....	65
4.1 ESTUDIO DE LA BOQUILLA (MAZZEI) USADA EN LA PATENTE ECOFLOT COMO GENERADOR Y DISTRIBUIDOR DE MICROBURBUJAS.	65
4.2 PROPUESTA DE RECONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA DE UN EDUCTOR PARA LOGRAR UNA ALTERNATIVA DE MEJORA EN LA PRODUCCIÓN DE MICROBURBUJAS BASADO EN LA LITERATURA.	69
CAPITULO 5.....	73
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN MEDIANTE SOFTWARE CFD.....	73
5.1 DISEÑO CAD Y EVALUACIÓN COMPUTACIONAL DE UNA DE LAS BOQUILLAS SELECCIONADAS BASADO EN EL ESTADO DEL ARTE.....	74
5.2 CONSTRUCCIÓN CAD Y EVALUACIÓN COMPUTACIONAL DE LA BOQUILLA (MAZZEI) UTILIZADA POR LA PATENTE ECOFLOT	82
5.3 CONSTRUCCIÓN CAD DE UN MODELO DE EYECTOR COMO ALTERNATIVA DE MEJORA	86
5.4 VERIFICACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN DFD DE LAS VENTAJAS DEL NUEVO DISEÑO RESPECTO AL SISTEMA DE BOQUILLAS ORIGINAL, EN CUANTO A SU CAPACIDAD PARA PRODUCCIÓN DE BURBUJAS.	91
5.5 RESULTADOS.....	99
CAPITULO 6.....	101
CONCLUSIONES.....	101
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXO A	109
ESTADO DEL ARTE SOBRE EDUCTORES.....	109
PATENTES	109
US Patent 4,534,862	110
Boquillas CavTube.....	110

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación
por Inyección de Gas

US 7784999 B1	111
US 7481937 B2	112
US 2004/0256325 A1	113
US 2004/0094848 A1	114
TRABAJOS DONDE SE USAN EDUCTORES PARA GENERACIÓN DE BURBUJAS.....	116
I.Flow Analysis Inside Jet Pumps Used for Oil Wells.....	116
II.Characterization of gas-liquid parameters in a down-flow jet loop bubble column	119
III.Influence of nozzle exit tip thickness on the performance and flow field of jet pump.	121
IV.Wastewater treatment by flotation.....	125
V. Influence of viscosity and surface tension on performance of gas-liquid contactors with ejector type gas distributor.....	126
VI.Investigation on hydrodynamics and mass transfer characteristics of a gas-liquid ejector using three-dimensional CFD modeling.....	128
VII. Gas-liquid numerical simulation on micro-bubble generator and optimization on the nozzle-to-throat spacing.....	129
COMPARACIÓN GEOMÉTRICA Y DE DESEMPEÑO DE LOS EDUCTORES ESTUDIADOS.....	131
ANEXO B	135
CONFIGURACIÓN E INSTALACIÓN DE ANSYS	135
Instalación de ANSYS 14.0	135
Configuración de FLUENT	145
Configuración del módulo de equilibrio de población (PBM).....	152
ANEXO C	157
SIMULACIÓN DE UNA COLUMNA DE BURBUJEO.....	157

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de unidad de flotación tipo gas disuelto.	19
Figura 2. Flotación por aire inducido en aguas de producción.	20
Figura 3. Columna de flotación.	20
Figura 4. Bomba saturadora.	21
Figura 5. Bomba EDUR.	22
Figura 6. Válvula de aguja HOKE.	22
Figura 7. Aireador.	23
Figura 8. Difusores de disco.	24
Figura 9. Parrilla de difusores.	24
Figura 10. Boquilla cilíndrica.	25
Figura 11. Funcionamiento de un eyector.	27
Figura 12. Diagrama esquemático del eductor.	28
Figura 13. Secciones internas del eductor.	28
Figura 14 dimensionamiento estructural de un eductor.	30
Figura 15. Componentes ECOFLOT.	34
Figura 16. Distribución de líquido a tratar, líquido a saturar, tuberías flexibles e inyectores.	35
Figura 17. Control de nivel.	36
Figura 18. Esquema de boquillas en un brazo distribuidor.	37
Figura 19. Caudal y velocidad en la boquilla.	39
Figura 20. Boquilla instalada en cabezal.	39
Figura 21. Succión de aire para diferentes velocidades de chorro de agua.	42
Figura 22 Relación entre los valores de garganta y la cantidad de aire succionado.	42
Figura 23 Relación espaciamiento de boquilla a garganta para el generador de microburbujas.	43
Figura 24 La influencia de la longitud del tubo mezclador.	44
Figura 25 Diámetro de la burbuja en toda la sección del generador.	45
Figura 26 Coeficiente de transferencia de masa volumétrica tubo mezclador varios QG / QL.	46
Figura 27 Influencia de la longitud del tubo mezclador sobre el coeficiente de transferencia de masa volumétrica.	47
Figura 28 Distribución de la tasa de disipación de energía dentro del tubo de mezcla.	52
Figura 29. Influencia del número de Reynolds sobre la transferencia de masa.	53
Figura 30. Comportamiento de la presión en el eje axial de un eductor.	54
Figura 31 Tipos de contacto partícula-gas.	55
Figura 32. Sistema de humectabilidad petróleo/agua/sólido.	61
Figura 33. Ángulos de contacto medidos a través de la fase agua.	61
Figura 34. Diseño estructural de la boquilla mazzei.	67

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación
por Inyección de Gas

Figura 35. Los dos diseños de eductores implementados para la generación de microburbujas y otras aplicaciones.	70
Figura 36. Nomenclatura seleccionada de los elementos que se variaran en el rediseño.	71
Figura 37. Evaluación CFD del desarrollo propuesto por Lijun Wang, Yan Jia.	74
Figura 38. Esquema geométrico propuesto por Dhanesh Patel, Ashvinkumar Chaudhari.	75
Figura 39. Boquilla seleccionada y recreada mediante Ansys, con velocidad de entrada 1.6 m/s.	77
Figura 40. Líneas de flujo representativas del fenómeno de succión.	78
Figura 41. Comportamiento del caudal dentro de la cámara de intercambio y la sección de difusión.	78
Figura 42. Capacidad de succión del eductor suministrado por la literatura con variaciones de alimentación motriz.	79
Figura 43. Coeficiente de transferencia de masa volumétrica $Q_G / Q_L=2.33$ eje axial del eductor.	79
Figura 44. Distribución de la tasa de disipación de energía dentro del tubo eyector para $Q_G / Q_L=2.33$	80
Figura 45. Influencia de la longitud del tubo mezclador sobre el coeficiente de transferencia de masa volumétrica para $LT/DT=12$	80
Figura 46. Tamaños de microburbujas.	81
Figura 47. Dimensiones boquilla Mazzei.	82
Figura 48. Modelo CAD boquilla Mazzei.	83
Figura 49. Obstrucción entre los dos fluidos en la boquilla Mazzei.	83
Figura 50. Líneas de flujo representativas del fenómeno de succión boquilla mazzei.	84
Figura 51. Comportamiento del caudal dentro del eductor mazzei.	84
Figura 52. Coeficiente de transferencia de masa volumétrica eje axial del eductor Mazzei.	85
Figura 53. Distribución de la tasa de disipación de energía dentro del tubo eyector.	85
Figura 54. Tamaños de microburbujas.	86
Figura 55. Boquilla propuesta y recreada mediante ANSYS, con velocidad de entrada 1.6 m/s.	87
Figura 56. Líneas de flujo representativas del fenómeno de succión en la alternativa de mejora.	88
Figura 57. Comportamiento del caudal dentro de la cámara de intercambio y la sección de difusión en la alternativa de mejora.	88
Figura 58. Capacidad de succión del eductor propuesto con variaciones de alimentación motriz.	89
Figura 59. Coeficiente de transferencia de masa volumétrica $Q_G / Q_L=8.71$ eje axial del eductor.	89

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación
por Inyección de Gas

Figura 60. Distribución de la tasa de disipación de energía dentro del tubo eyector para $QG / QL=8.17$.	90
Figura 61. Tamaños de microburbujas.	90
Figura 62. Capacidad de succión de las boquillas estudiadas.	91
Figura 63. Capacidad de succión de las boquillas estudiadas a diferentes velocidades de alimentación.	92
Figura 64. Caudal en la zona de mezclado de los dispositivos estudiados.	92
Figura 65. Velocidad del fluido a lo largo de la sección de mezclado de las boquillas estudiadas.	93
Figura 66. Coeficiente de transferencia de masa volumétrica en los eductores estudiados.	94
Figura 67. Porcentajes del Coeficiente de transferencia de masa volumétrica en los eductores estudiados.	94
Figura 68. Distribución de la tasa de disipación de energía en los eductores estudiados.	95
Figura 69. Porcentaje de la distribución de la tasa de disipación de energía en los eductores estudiados.	95
Figura 70. Disipación de energía cinética turbulenta según FLUENT para cambios en la distancia boquilla sección de mezcla y diámetro en la boquilla propuesta como alternativa de mejora.	96
Figura 71. Tamaños de microburbujas en los eductores estudiados.	97
Figura 72. Boquilla tipo tobera con deflector en eje de propulsión.	110
Figura 73. Boquilla CavTube.	111
Figura 74. Eductor con lóbulos en la garganta difusora.	112
Figura 75. Boquilla de ozonificación para tratamiento de aguas residuales.	113
Figura 76. Boquilla distribuidora.	114
Figura 77. Eductores para inducción de gas.	115
Figura 78. Componentes de la bomba de chorro.	116
Figura 79. Variación de la relación head ratio con relación de flujo de masa a diferentes viscosidades de fluido secundario (Líquido primario: agua).	118
Figura 80. Variación de la eficiencia con relación de flujo de masa a diferentes viscosidades de fluido secundario (Líquido primario: agua).	118
Figura 81. Efecto de eficiencia respecto a la relación de área a diferentes Lm/dm .	119
Figura 82. Succión de aire frente al caudal de líquido motriz con variación de diámetro de boquillas 6-5 mm.	120
Figura 83. Caracterización de los parámetros gas-líquido en una columna de burbujas de bucle de chorro descendente.	121
Figura 84. Estructura del eductor.	122
Figura 85. Plano y dimensionamiento estructural de la boquilla.	123
Figura 86. Distribución del campo de flujo alrededor de la salida de la boquilla, $q=2$.	124
Figura 87: Distribución de k con diferentes δe , $q = 0.1$.	124

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación
por Inyección de Gas

Figura 88. Dimensiones y la configuración del equipo.	125
Figura 89. Influencia de la relación Q aire / Q L.	126
Figura. 90. Eyector conjunto con cuerpo de remolino (swirl).	127
Figura 91. Esquema geométrico del eductor estudiado , variaiones de la region 3.	129
Figura 92. Relación de espaciamento boquilla a garganta.	130
Figura 93. Generación de licencia.	135
Figura 94. Archivo AP14_Calc.	136
Figura 95. Setup de instalación ANSYS14.0.	136
Figura 96. Términos y condiciones ANSYS14.0.	137
Figura 97. Directorio de instalación ANSYS14.0.	137
Figura 98. Selección de herramientas a instalar ANSYS14.0.	138
Figura 99. Configuraciones futuras de ANSYS14.0.	138
Figura 100. Configuraciones futuras de instalación ANSYS14.0.	139
Figura 101. Exportar desde solidworks e inventor.	139
Figura 102. Verificación de las condiciones de licencia ANSYS 14.0.	140
Figura 103. Extracción de las condiciones de licencia ANSYS 14.0.	140
Figura 104. Culminación de la instalación de productos ANSYS 14.0.	141
Figura 105. Habilitación de la licencia ANSYS 14.0.	141
Figura 106. Aprobación de las condiciones de licencia ANSYS 14.0.	142
Figura 107. Habilitación de Ansys Inc. License Manager.	142
Figura 108. Extracción de los paquetes de licencia ANSYS 14.0.	143
Figura 109. Habilitación del archivo de licencia ANSYS 14.0.	143
Figura 110. Archivo de licencia ANSYS 14.0.	144
Figura 111. Finalización de la instalación de ANSYS 14.0.	144
Figura 112. Procedimientos del software FLUENT.	145
Figura 113. Simulación boquilla Mazzei 484.	146
Figura 114. SETUP FLUENT.	147
Figura 115. Configuración general.	147
Figura 116. Sección "Models".	148
Figura 117. Sección "Phases".	149
Figura 118. Boundary Conditions.	149
Figura 119. Configuración de entrada y salida.	150
Figura 120. Solution Methods.	150
Figura 121. Solution Initialization.	151
Figura 122. Run calculation.	151
Figura 123. Setup Fluid flow (FLUENT).	152
Figura 124. Selección de la opción Double precisión.	152
Figura 125. Configuración módulo Multiphase.	153
Figura 126. Configuración del material para la segunda fase.	153
Figura 127. Parámetros a evaluar.	154
Figura 128. Especificaciones de entrada para equilibrio poblacional.	154
Figura 129. Configuración módulo de evaluación (PBM).	155

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación
por Inyección de Gas

Figura 130. Resultados de evaluación modulo (PBM).	156
Figura 131. Velocidad de entrada del gas variable.	158
Figura 132. Diámetro del inyector fijo.	159
Figura 133. Fenómeno de coalescencia.	160
Figura 134. Coalescencia tiempo variable.	161
Figura 135. Variando el diámetro del inyector.	162

Lista de Tablas

Tabla 1. Zonas de separación de crudo.....	17
Tabla 2. Condiciones de operación de las boquillas Mazzei.....	38
Tabla 3. Caudal y velocidad de cada boquilla.....	38
Tabla 4. Clasificación de burbujas.....	50
Tabla 5. Relación de la cantidad de aire en agua.....	51
Tabla 6. Relación de Saffman.....	58
Tabla 7. Criterios para trayectorias de burbujas.....	59
Tabla 8. Boquilla utilizada por ECOFLOT.....	66
Tabla 9. Ficha técnica de la boquilla Mazzei.....	66
Tabla 10. Dimensiones del dispositivo eyector de microburbujas de la empresa mazzei.....	68
Tabla 11. Dimensionamiento del eductor propuesto.....	71
Tabla 12. Dimensionamiento estructural de la propuesta de Dhanesh Patel, Ashvinkumar Chaudhari.....	75
Tabla 13. Diámetro de microburbujas evaluadas en (PBE) para cada índice de clase.....	82
Tabla 14. Eficiencia de las boquillas estudiadas.....	98
Tabla 15. Comparación de resultados entre las boquillas evaluadas mediante fluent.....	99
Tabla 16. Parámetros de funcionamiento de las boquillas.....	109
Tabla 17. Secciones del eyector bombas de chorro.....	117
Tabla 18. Dimensionamiento estructural de las secciones del eyector.....	121
Tabla 19. Dimensiones del dispositivo estudiado.....	123
Tabla 20. Especificaciones de la leche en polvo la serenissima (mastellone Hnos S.A argentina).....	126
Tabla 21. Tabla de parámetros Venturi.....	129
Tabla 22. Dimensiones del eductor propuesto por Lijun Wang y Yan Jia.....	130
Tabla 23. Comparación estructural de los diferentes eyectores consultados.....	132
Tabla 24. Configuración de FLUENT para recrear la formación de microburbujas en una columna de flotación.....	157

Introducción

Actualmente (diciembre de 2016), la globalización de la economía y el avanzado desarrollo tecnológico en todos los campos, exigen a las diferentes industrias un alto nivel de competitividad; para mantenerse en los mercados altamente competitivos, es necesario invertir y dar alta prioridad a los aspectos de I+D, incluso, debe agregarse sin temor alguno el concepto de innovación, de tal manera que se cuente con áreas de I+D+I. Si estos “mandamientos” de competitividad no son tenidos en cuenta, es imposible que una organización, por fuerte que parezca, se mantenga vigente y genere rentabilidad.

En Colombia, se ha venido trabajando en la implementación de tecnologías y técnicas que mejoren visiblemente los diferentes procesos que se ejecutan en la industria del país. Éste es el caso de la empresa ECOPETROL S.A, una de las grandes compañías nacionales quienes, a pesar de las dificultades que ha generado la caída de los precios del petróleo, ha invertido en el desarrollo de tecnologías y metodologías que aportan positivamente a los procesos y operaciones que desarrollan. En el año 2010, la empresa logró patentar el sistema denominado ECOFLOT (sistema de separación de aguas de producción) basado en la técnica de flotación por microburbujas, este desarrollo “fusiona” las características más importantes de los sistemas IAF y DAF (flotación por aire/gas inducido o disuelto) para generar un sistemas altamente eficiente y que reduce considerablemente los costos de implementación y mantenimiento. El desarrollo de la tecnología ECOFLOT fue llevado a cabo por personal que actualmente no se encuentra vinculado a la empresa, hecho que ha generado diferentes tipos de dificultades en cuanto a operación y mejoramiento. En este sentido, se hace necesario sostener y enriquecer el sistema patentado, de tal manera que sus prestaciones impacten positivamente el crecimiento y desarrollo de la compañía. En este documento se lleva a cabo la investigación del funcionamiento del sistema generador de microburbujas para el sistema de separación crudo/agua ECOFLOT, pues como se puede constatar en la literatura consultada los diferentes autores hacen hincapié en que el dimensionamiento del generador en este caso un dispositivo Venturi es directamente proporcional a la eficiencia del sistema conjunto, haciendo relevancia en el diámetro de la boquilla, relación diámetro/longitud del tubo de mezcla y la proporción de distancia entre la boquilla y la sección de intercambio. Sin embargo dentro de las secciones internas del generador de microburbujas actúan las condiciones de mecánica de fluidos, como fricción, turbulencia, transporte de masa, intercambio energético y tensión superficial etc. Estos principios han sido estudiados desde perspectivas empíricas y teóricas, tratando de encontrar una relación que pueda suplir las necesidades de cada aplicación, pues los eductores como también son llamados abarcan muchos campos de aplicación desde minería, aviación, simples mecanismos de riego, aplicaciones automotrices etc. Por lo que definir previamente su aplicación es fundamental para su diseño. Con toda esta

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

gama de aplicaciones la literatura se sigue quedando corta, pues no hay un principio que garantice que el diseño tenga un comportamiento óptimo. Sin embargo estudios como [1],[2],[3], dejan un panorama más claro en sus investigaciones, en donde relacionan ecuaciones para estimar las posibles dimensiones más concordantes de las secciones importantes de dicho dispositivo. Es así como se encontró una base para poder evaluar el dispositivo utilizado por la patente actualmente, un eductor de la empresa Mazzei el cual fue comparado con dos eyectores más, uno propuesto por los autores Lijun Wang, Yan Jia [4] para evaluar la relación distancia boquilla-tubo de mezcla y Dhanesh Patel, Ashvinkumar Chaudhari [2] quienes dimensionan cada sección del eductor en su propuesta. Basándose en sus principios de funcionamiento y de diseño un segundo eductor propuesto como alternativa de mejora para el sistema ECOFLOT, como no se cuenta con un laboratorio de pruebas se evaluaron los dispositivos en la herramienta Ansys fluent 14.0, corroborando que la aproximación CFD mediante elementos finitos augura una cercanía confiable tanto de las teorías propuestas por los autores como de las ecuaciones de aproximación que evalúan los solvers programados para discretizar las miles de ecuaciones necesarias para apreciar virtualmente el comportamiento de los fluidos de alimentación de los Venturi.

Finalmente para dar un diagnóstico de los generadores en cuestión se hace necesario evaluar la eficiencia, cantidad del segundo fluido succionado y el tamaño de las microburbujas, para dar un veredicto de eficiencia se recurre al planteamiento de Fredrik Liknes [5] y como el software ansys proporciona la velocidad de los fluidos en las secciones internas de la estructura evaluada se puede calcular el caudal y por último para hacer juicio del tamaño de burbujas se recurrió al solver MUSIG que mediante estadística basada en el número de sauter arroja resultados tanto de tamaños como de coalescencia de las microburbujas generadas mediante PBM (population balance model). Y es así como la investigación llevada a cabo arrojó una eficiencia del nuevo dispositivo respecto a los otros que fueron diagnosticados con la herramienta ANSYS.

CAPITULO 1

BASES CONCEPTUALES

En este capítulo se presentan los conceptos necesarios para entender cómo funciona la técnica de flotación por inyección de gas para la separación de crudo-agua empleada en la patente Ecoflot de Ecopetrol, así como también los principios involucrados en la generación de microburbujas por inyección de gas, que es la base de la técnica de flotación empleada en esa patente.

En el proceso de tratamiento de crudo, la línea de tratamiento de aguas producidas se estructura en tres zonas jerárquicas: primaria, secundaria y terciaria.

En la primaria, se disminuye el contenido de aceites, grasas flotantes y sólidos en suspensión de manera general. Los tratamientos consisten en procesos de desarenado, sedimentación y remoción de aceites o grasas; donde se separa el hidrocarburo libre, existiendo diversos diseños de separación con diferencias en efectividad [6]; estos tratamientos se llevan a cabo aprovechando las diferencias de densidad de las sustancias contenidas utilizando la fuerza de gravedad, con lo que los tiempos de retención pueden llegar a ser demasiado grandes.

Para el tratamiento en la zona secundaria, se utilizan técnicas más avanzadas teniendo en cuenta que los contenidos residuales en esta sección presentan diámetros más pequeños, por este hecho la patente Ecoflot (sistema de separación de aguas de producción desarrollado por la empresa Ecopetrol S.A.) hace énfasis en estos aspectos (en la sección 1.2 se describirá más a fondo los mecanismos que utiliza la patente y su descripción general).

El tratamiento en la zona terciaria es considerado una etapa de pulimiento, es probable que en esta sección el contenido de partículas sea muy bajo y se lleve a cabo para cumplir, explícitamente, con las normas legalmente estipuladas sobre vertimiento y disposición final de aguas de producción.

Cabe resaltar que muchas investigaciones hacen referencia a la implementación de procesos químicos para acelerar el proceso de tratamiento, estas implementaciones han logrado grandes beneficios, entre ellos, la adhesión de floculantes coagulantes e inhibidores, cuando el proceso así lo permite.

La Tabla 1, presenta un esquema de las diferentes zonas estipuladas dentro del proceso de separación entre el crudo y las aguas excedentes, además, se consignan los métodos físicos que se implementan a la hora del tratamiento de las aguas de producción en campo.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Tabla 1. Zonas de separación de crudo.

TRATAMIENTO	SISTEMAS FISICOS	EQUIPO/METODO
Tratamiento Primario	Separación gravitatoria	Equipos o tanques skimmers
		Separadores API
		Piletas disposal
		Piletas Skimmers
	Platos coalescedores	Platos interceptores en paralelo
		Platos interceptores corrugados
		Separadores de flujo cruzado
		Separadores de flujo mixto
	Separación gravitacional Mejorada	Centrifugas
		Hidrosiclones
	Coalescedores mejorados	Precipitaderos
		Filtros /coalescedores
		Coalescedores turbulentos de flujo libre
Tratamiento secundario	Filtración	Multimedios
		Membranas
	Flotación	Gas disuelto
		Gas disperso hidráulico
		Gas disperso mecánico
Tratamiento terciario	Piscinas	Piscinas Aeróbicas
		Piscinas Anaeróbicas.
		Piscinas Facultativas.
		Piscinas de Sedimentación.
		Piscinas de Oxidación.
	Filtros	Filtros de cáscara de nuez
		Filtros de tierra diatomea
		Filtros de cartucho
		Filtros multi -lecho (MMF)
		Filtro pulidor (granate/antracita)

Fuente: Propia.

Teniendo en cuenta que el objetivo del presente trabajo de grado es proponer una alternativa de mejoramiento para la eficiencia de producción de burbujas del sistema de separación crudo-agua de la patente ECOFLOT, se hace énfasis en los mecanismos físicos del tratamiento secundario, en especial la técnica de flotación por inyección y dispersión de gas.

1.1 Estado del arte de las unidades de flotación por inyección de gas.

El sistema de flotación es utilizado desde hace más de 100 años en la industria minera para separar sólidos con diferente densidad e incorporado para tratar efluentes industriales en refinerías. Estas técnicas emplean un proceso en el cual, pequeñas burbujas de gas son generadas y dispersadas dentro de un recipiente contenedor de agua en el cual hacen contacto con las gotas del aceite/crudo y partículas sólidas [7]. Las burbujas de gas incrementan la diferencia de densidades y ayudan a las gotas de aceite/crudo a ascender rápidamente a la superficie para su posterior recolección. En la sección 3.2 se ampliarán los detalles de esta técnica.

Se pueden encontrar dos clases de unidades de flotación, diferenciándose por el método de producción de burbujas de aire/gas en el agua a tratar. Los métodos más conocidos son “unidades de flotación por gas/aire disuelto” (DAF) y “unidades de flotación por gas/aire inducido” (IAF) [8].

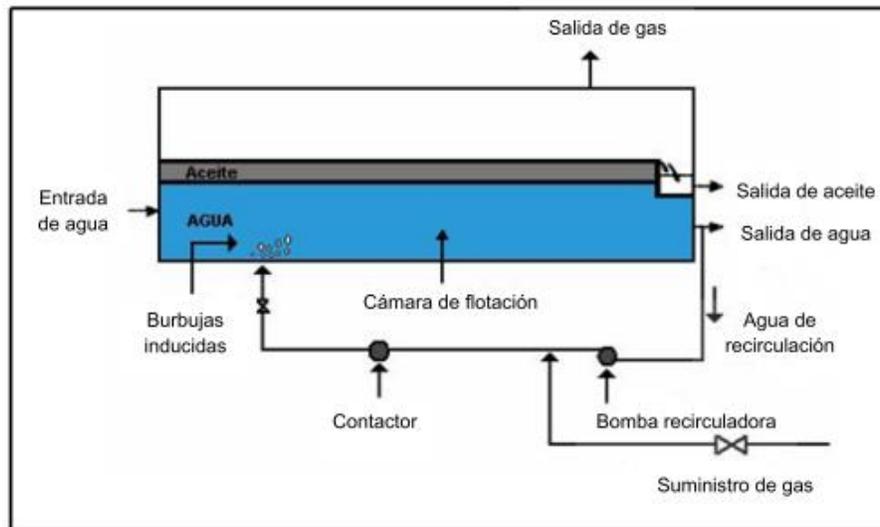
1.1.1 Unidades de flotación tipo gas disuelto (DAF)

En la flotación DAF se toma parte del agua que ha sido tratada, se satura con gas/aire (N₂, metano, gas natural, nitrógeno, CO₂, entre otros) y luego es inyectada al equipo [9]. A mayor presión más cantidad de gas puede ser disuelto en el agua [10] de modo que al entrar al recipiente, el gas disuelto en el agua recirculada se rompe formando pequeñas burbujas [7]; este tipo de unidades han resultado útiles en operaciones de refinería en las cuales, el aire se ha utilizado de la misma forma que el gas (para saturación del fluido). Si el fluido es inyectado a un pozo, se debe evitar la presencia de oxígeno en el aire. Aunque resulta más práctico el uso de gas natural, dado que no se lleva a cabo la remoción del oxígeno; es indispensable la instalación de una unidad de venteo o sistemas de recolección de gas en este tipo de implementaciones, como se ilustra en la **Figura 1**.

Los tamaños de burbujas generadas con estas unidades oscilan entre 10 y 100 μm . Este proceso es bastante costoso pues se requiere un compresor que genere en el aire una presión de 304,07 kPa a 405,43 kPa por encima de la presión de la corriente de agua. Además, se necesita una cámara presurizada con recirculación y un sistema para controlar la presión al liberar la corriente de agua saturada [11].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Figura 1. Esquema de unidad de flotación tipo gas disuelto.



Fuente: Tomada de [7].

1.1.2 Unidades de flotación tipo gas inducido (IAF)

La flotación por aire inducido (IAF), ha sido utilizada extensivamente para el tratamiento de aguas de producción, ver Figura 2. Esta técnica utiliza equipos motorizados que inducen el gas dentro de la fase acuosa, como los aireadores, flotadores mecánicos (constituidos por un impeler movido por motor que succiona agua y ésta a su vez succiona el aire del ambiente). A la salida del impeler, unas pequeñas perforaciones producen las burbujas. Las burbujas generadas en este tipo de unidades son de mayor tamaño que en las unidades de flotación tipo gas disuelto, dado que no se encuentran en solución con el fluido y el ascenso de las burbujas a superficie será más rápido, ocasionando así un tiempo de residencia menor [12]. En este proceso, los valores típicos de tamaño de burbuja generado son superiores a 1.000 μm . Debido a los grandes tamaños de burbuja, se incrementa la cantidad de aire que se debe inyectar para que el proceso sea eficiente. Este sistema requiere, además, grandes difusores para tener influencia sobre toda el agua por tratar [11].

Los mecanismos de generación de burbujas pueden ser del tipo eyector que usa menos energía y menos gas que el rotor y tiene una relación de gas/agua de alrededor de 10 pies cúbicos por barril [12].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Figura 2. Flotación por aire inducido en aguas de producción.

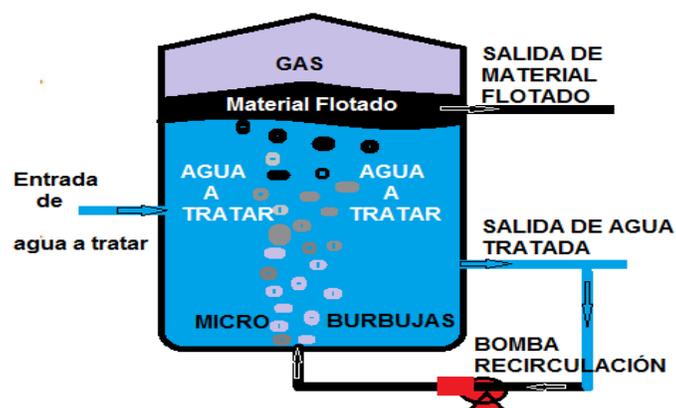


Fuente: Tomada de [11]

1.1.3 Flotación en columna

La flotación en columna se caracteriza, debido a sus excelentes características de transferencia de masa y calor [13], por presentar un diseño rectangular, cuadrado o redondo, con poco diámetro y una gran altura Figura 3, sin embargo es comúnmente diseñada en forma redonda y particularmente es alimentada con el líquido que va a ser tratado a una altura de 2/3 de la base aproximadamente, en la parte superior se aglomera el material flotado para ser removido ya sea por un mecanismo de palas accionadas por motores o por el método de desborde.

Figura 3. Columna de flotación.



Fuente: Propia

La inyección del aire/gas es la parte fundamental de la columna de flotación, lo cual da origen a la generación de microburbujas, teniendo en cuenta las técnicas de flotación expuestas (DAF/IAF), para buscar mejorar el enjambre de burbujas y el

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

tamaño de las mismas. Para este propósito particularmente se utilizan inyectores cerámicos, tubos perforados, platos con cubierta de lona, dispositivos Venturi. Para la generación de burbujas de tamaños medios se necesita un alto volumen de aire y para la generación de microburbujas se requiere alta área superficial [10][13].

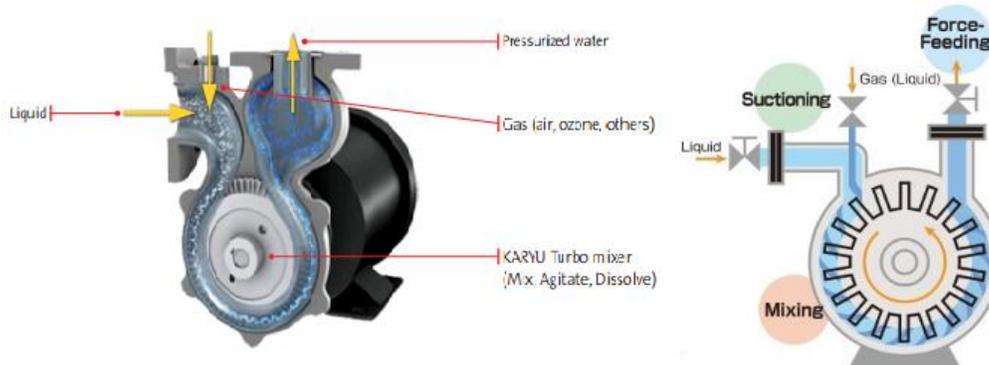
1.2 Generadores de microburbujas.

1.2.1 Dispositivos para la Generación de Burbujas tipo DAF

Bombas Saturadoras

Son capaces de producir burbujas en un rango de 5 a 10 micras e incluso menores, tienen su principal aplicación en sistemas de flotación por aire disuelto DAF, así como en aplicaciones de ozonización, ver Figura 4. Entre las principales ventajas de estos equipos se puede destacar que no requieren del uso de un compresor, permitiendo un menor dimensionamiento. La instalación y operación es sencilla, presenta un bajo consumo eléctrico y además, estos equipos están disponibles en distintos materiales, pudiéndose usar también con agua de mar [14].

Figura 4. Bomba saturadora.



Fuente: Nikuni KTM Series.

Bombas Centrifugas Multifase

Pueden transportar el fluido en 2 fases, mezcla de líquido y gas. Sus principales ámbitos de aplicación son: flotación por aire disuelto (DAF), instalaciones de biocombustible, flotación para reducir la presión, neutralización, acondicionamiento del agua potable, biorreactores, separación de agua/petróleo en plataformas petroleras y campos petrolíferos. Sus principales características son el manejo de mezclas de líquido-gas, carga gas en líquidos. Mediante una alimentación separada de líquidos y gases, se consigue una buena mezcla de ambas fases, así como un elevado grado de dispersión, un bajo desgaste en el caso de inevitable contaminación de líquidos con partículas sólidas. Presentan condiciones de bombeo

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

estables con puntos de operación cambiante, uniforme mezcla de líquido y gas en la bomba para generar microburbujas [15], como se muestra en la Figura 5.

En función del modelo de bomba seleccionada, se puede alcanzar un contenido de gas de hasta un 30% [15]. Dependiendo de las aguas residuales y de la presión de saturación con las bombas multifase, se pueden alcanzar dispersiones con tamaños de burbuja entre 30 y 50 micras.

Figura 5. Bomba EDUR.



Fuente: Tomado de [15].

Válvulas de Aguja

Se lleva a cabo la producción de burbujas una vez la corriente de agua es recirculada y saturada con aire a presión, y además, dicha corriente pasa por un proceso de expansión a través de una boquilla o una válvula de aguja ver Figura 6. De esta manera se producen burbujas muy finas del orden de 50-100 μm , que dan al líquido un aspecto lechoso. Este método es el más empleado en las plantas de clarificación de aguas [16].

Figura 6. Válvula de aguja HOKE.



Fuente: Tomado de [16].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Aireador

El sistema es una combinación de una bomba sumergible y un “jet”, ver Figura 7. Por la acción de la corriente eyectada de la bomba sumergible en la entrada del difusor, se genera vacío y permite la entrada de gas (aire) a través de la cañería de alimentación del mismo. El gas (aire) es mezclado con el líquido (agua) y la mezcla es eyectada. La fuerza causada por la corriente eyectada es remarcablemente grande, con el resultado de una excepcionalmente alta eficiencia de disolución o dispersión del gas (oxígeno) en el líquido (agua). La mezcla es presurizada al punto en que puede ser eyectada al medio. Como resultado, diminutas burbujas de gas (aire) son eyectadas en un estado de presurización positiva respecto al sistema, permitiendo disolver en el líquido (agua) una gran cantidad del mismo gas (oxígeno). El diámetro de burbuja puede ser controlado por medio de agitadores estáticos en el difusor.

Figura 7. Aireador.



Fuente: Ingenova, Argentina.

1.2.2 Dispositivos para Generación de Burbujas tipo IAF

Los sistemas de flotación más populares que utilizan la técnica de generación de burbujas IAF se describen a continuación.

Difusores de Disco de Membrana

En los difusores de disco ver Figura 8a, el aire suministrado accede centralmente bajo la membrana y crea un colchón de aire. De ese modo, la membrana se abre y el aire fluye en forma de pequeñas burbujas hacia el agua a tratar. En estado de reposo tiene lugar un sellado adicional por medio del tapón de estanqueidad Figura 8b, que desciende por efecto de la presión del agua hacia las superficies de sellado del plato de apoyo (válvula anti-retorno) [17].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Figura 8. Difusores de disco.
a). Difusor de disco. b). Válvula anti retorno.



Fuente: Tomado de [17].

Difusor Micro Poroso

Los difusores micro-porosos ver Figura 9, generan burbujas finas capaces de duplicar la transferencia de aire disuelto en el agua dulce y triplicar en agua salada respecto a sistemas de aireación convencionales (Difusores de disco, Aireador de hélice, Paleta, Aireador de escobilla). La efectividad del difusor micro poroso es muy alta y si se emplean con floculantes se podría llegar a más de 95% de eficiencia en la reducción de partículas de las aguas producidas. Los difusores micro porosos demandan muy poca energía (más del 50% ahorro en energía eléctrica) que se puede utilizar de forma segura para los tratamientos de aguas residuales, cuenta además con material resistente. Tiene bajo costo de operación, es fácil de instalar y de realizar su mantenimiento. Ayuda a mezclar mejor el agua, reducir zonas muertas[18].

Figura 9. Parrilla de difusores.



Fuente: Tomado de [18].

La composición física es 75% Jebe y 25% Polietileno, internamente posee diámetros desde 12mm - 25mm, su mínima curva de doblado es 10 cm. Soporta

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

una presión máxima de 25 psig, el rango de temperatura es de -23°C a $+57^{\circ}\text{C}$, los tamaños de micro poros es de 50 micrones [18].

Boquillas

Se llama boquillas a todos los tubos adicionales de pequeña longitud, constituidos por piezas tubulares adaptadas a los orificios. Se emplean para dirigir el chorro líquido, su longitud debe estar comprendida entre “vez y media” y “tres veces” su diámetro [19]. Las boquillas pueden ser entrantes o salientes y se clasifican en cilíndricas, ver Figura 10, convergentes y divergentes. A las boquillas convergentes suele llamárseles toberas.

Figura 10. Boquilla cilíndrica.



Fuente: Tomado de [15].

- **Boquillas Cilíndricas o Patrón:** Su longitud iguala 2,5 veces su diámetro y la contracción de la vena ocurre en el interior.
- **Boquillas Convergentes:** Con las boquillas cónicas se aumenta el caudal, experimentalmente se verifica que en las boquillas convergentes la descarga es máxima.
- **Boquillas Divergentes o toberas:** Las boquillas divergentes con la pequeña sección inicial convergente se denominan Venturi, por haber sido estudiados por este investigador italiano. Las experiencias de Venturi demuestran que un ángulo de divergencia de 5° , combinado con la longitud del tubo igual a nueve veces el diámetro de la sección estrangulada, permite los más altos coeficientes de descarga [15].

Como se pudo evidenciar, los dos sistemas (DAF, IAF) llevan a cabo, aunque en diferentes etapas, el contacto del agua saturada con aire/gas.

Con toda esta gama de posibilidades la propuesta de mejoramiento hace énfasis en la implementación del dispositivo Venturi debido a que este es un sistema robusto y económico, sin partes móviles, que no requiere aporte externo de energía eléctrica por lo tanto presenta un desgaste reducido, facilidad de operación y bajos costos de mantenimiento y operación; como también reduce requisitos de peso y espacio en

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

planta, además son estables al movimiento y tiene buenas características de transferencia de calor y masa[20],[9],[21],[22],[23].

1.3 El eyector o dispositivos Venturi

El eyector o eductor es un dispositivo basado en el principio de Bernoulli quien mostró que una reducción del flujo experimenta un diferencial de presión interna generando que el fluido circulante adquiera una mayor velocidad [24]. En este caso este dispositivo será el generador de microburbujas, mostrándose como el componente central de esta investigación influyendo directamente en el sistema de flotación, al afectar el tamaño y la distribución de las burbujas [3].

Sin embargo, el comportamiento de los fluidos en la sección interna del dispositivo presenta una gran complejidad por tratarse de fluidos multifásicos lo que ha hecho que en la mayoría de investigaciones las dimensiones estructurales se elijan usando datos experimentales y fórmulas empíricas tanto para el diseño del eyector como para la descripción de su comportamiento en la columna de flotación [25]. Por lo tanto, el dispositivo como generador de microburbujas tiene la desventaja de altos costes de desarrollo y difícil comprobación matemática. Esto hace que el diseño del eductor sea muy confuso y presente inconvenientes para su investigación [3].

Dependiendo de la aplicación, puede haber diferentes objetivos para el diseño de un eyector que son los siguientes [2]:

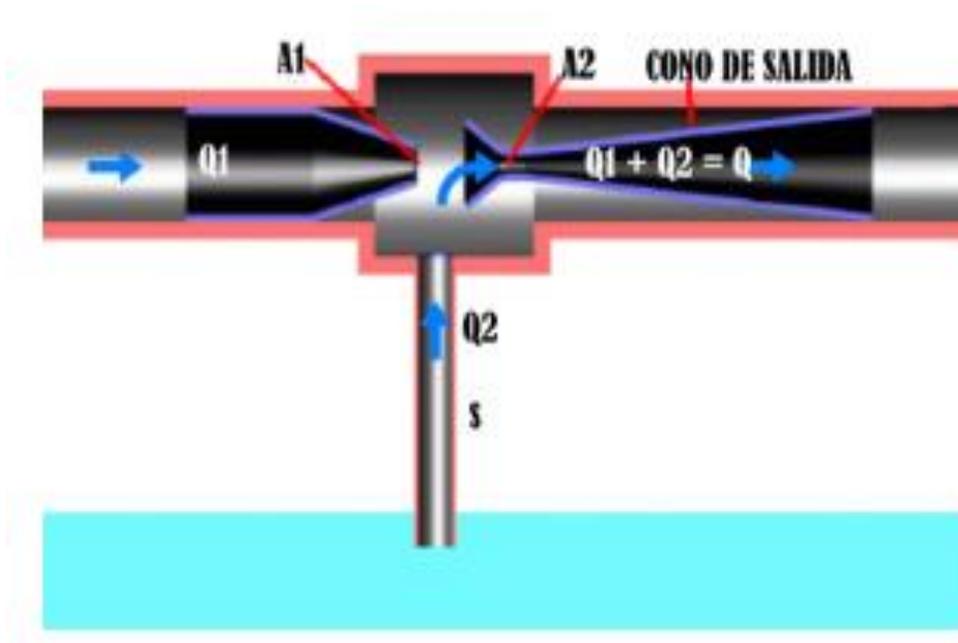
- Para lograr un mayor arrastre del fluido secundario.
- Para producir una mezcla profunda entre los dos fluidos.
- Para inyectar fluidos de una región de baja presión a una región de presión más alta.

1.3.1 Funcionamiento

En el esquema de la Figura 11 se puede comprender el funcionamiento de un eyector desde el punto de vista general.

El caudal por la sección Q_1 , al circular a través de la tobera A_1 , adquiere gran velocidad, originando vacío por medio del cual se succiona una cantidad de caudal Q_2 a entrar a la cámara de intercambio a través del tubo de succión S , la unión de los caudales $Q_1 + Q_2$ sale a gran velocidad a través de la garganta A_2 , que no es más que una boquilla divergente o sección de recuperación para que la velocidad se transforme en carga a presión a los efectos correspondientes.

Figura 11. Funcionamiento de un eyector.



Fuente: tomada de [24].

1.3.2 Principios operativos de un generador de microburbujas.

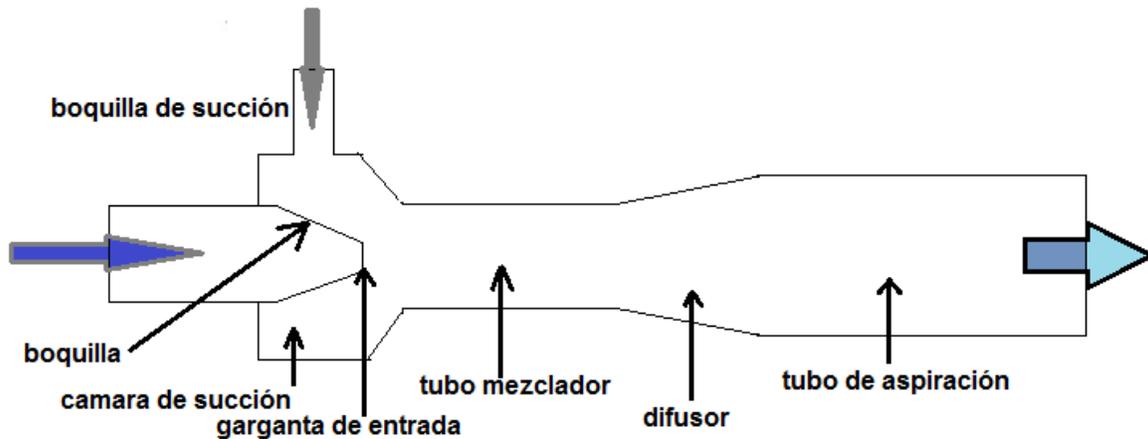
Los eductores son sistemas hidráulicos que utilizan un fluido impulsor para arrastrar otro fluido. El fluido impulsor puede ser un líquido, vapor o cualquier otro gas. El fluido de aspiración arrastrado puede ser un gas o un líquido [26],[27].

El principio de funcionamiento se basa en la transferencia de energía desde el fluido que se mueve a alta velocidad también llamado fluido motor, hasta el fluido de succión o fluido arrastrado. El diagrama esquemático del eductor conformado por sus diferentes secciones a lo largo de su sección interna se muestra en Figura 12.

El generador de burbujas tipo Venturi y sus secciones internas presentan cualidades de funcionamiento únicas las cuales se diseñan según su utilidad, ya sea como eyector, intercambiador, lavador, medidor, extractor o en este caso dispositivo volumétrico de coeficiente de masa. Sin embargo se generalizan las siguientes secciones: boquilla, cámara de succión, garganta, entrada de la garganta, tubo mezclador, difusor y tubo de aspersión o contacto.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

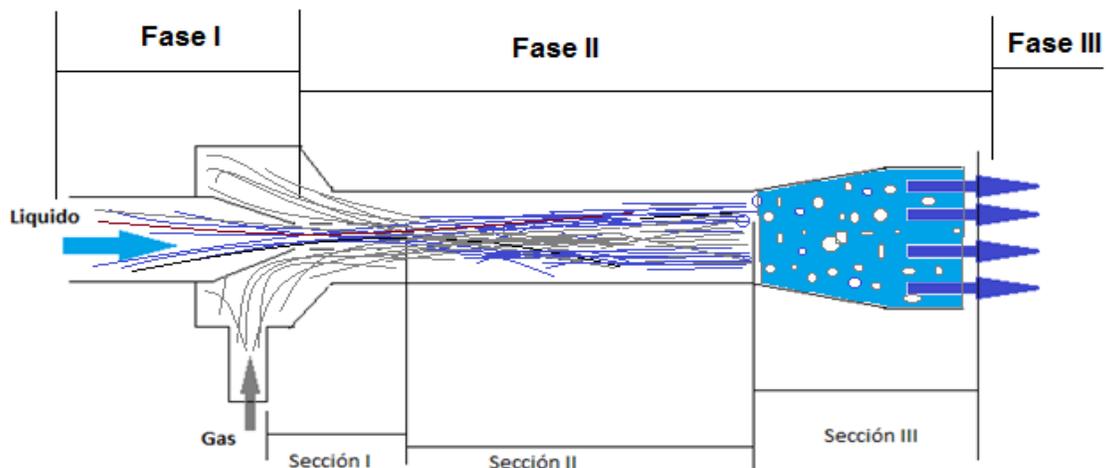
Figura 12. Diagrama esquemático del eductor.



Fuente: Propia.

Fase I: El fluido primario es el medio de trabajo, típicamente líquido o agua limpia previamente tratada, este es bombeado al sistema a alta velocidad y presurizado aproximadamente 0,2-0,4 MPa a través de una boquilla [3]. Según el principio de Bernoulli, se crea una zona de baja presión en la cámara de succión, en la que se extrae el fluido secundario, típicamente este fluido secundario está en fase gaseosa. Una vez generado el proceso de succión los dos fluidos se convierten en un chorro de alta velocidad (alrededor de 20 m/s) cuando sale de la boquilla [1]. El desplazamiento del chorro de alta velocidad por las secciones internas del eductor se puede dividir en tres secciones de estudio; a estas se les denominará fase II, ver **Figura 13**.

Figura 13. Secciones internas del eductor.



Fuente: Propia.

Sección I: Es un área de movimiento relativo entre el gas y el líquido en la que se presenta un intercambio muy leve inicialmente de las dos sustancias. Dado que el líquido en esta sección es denso, el gas es llevado a la garganta sección II desde la cámara de succión debido a un efecto viscoso en la capa límite, tanto el líquido como el gas inicialmente son continuos coaxiales en este punto, y se mueven consistentes uno respecto al otro. El chorro comienza a producir pulsos y ondas superficiales en la segunda mitad de esta sección como resultado de perturbaciones externas convirtiéndose el chorro en flujo anular o régimen de flujo multifásico; en el cual el fluido más ligero fluye en el centro del conducto y el fluido más pesado está contenido en una película fina en la pared de la tubería, siendo el fluido más ligero el gas/aire o una emulsión. Este flujo de chorro persiste durante cierta distancia en el tubo mezclador [1].

Sección II: Es un área de movimiento de flujo en donde se produce un choque de mezcla en un lugar particular del tubo mezclador [28],[29], debido a que la amplitud de la onda de superficie del chorro aumenta constantemente por la difusión turbulenta de la masa líquida [1]. Además, la onda superficial de la corriente del chorro se corta cuando la amplitud de la onda excede el radio de la corriente del hilo formado previamente por la garganta de entrada de la boquilla de la fase I. Por ende la ubicación de la zona de choque es una clave importante en el rendimiento del eyector. El rendimiento óptimo de dispersión se consigue cuando el chorro de líquido se rompe justo al final del tubo mezclador. Si la desintegración del chorro se produce antes, el flujo de la mezcla homogénea de gas-líquido a través de la parte restante del tubo de intercambio dará lugar a pérdidas excesivas por fricción [30]. Por otro lado, si el tubo mezclador es demasiado corto, el chorro no se rompe y, en consecuencia, no se produce el transporte de momento entre las fases. Como resultado, la eficiencia del eyector disminuye abruptamente [30]. Obviamente, la aparición del desprendimiento del chorro y la posición de la zona de choque de mezcla en el tubo de intercambio dependen del caudal de gas y líquido y de los parámetros del eyector tales como la longitud del tubo mezclador [31].

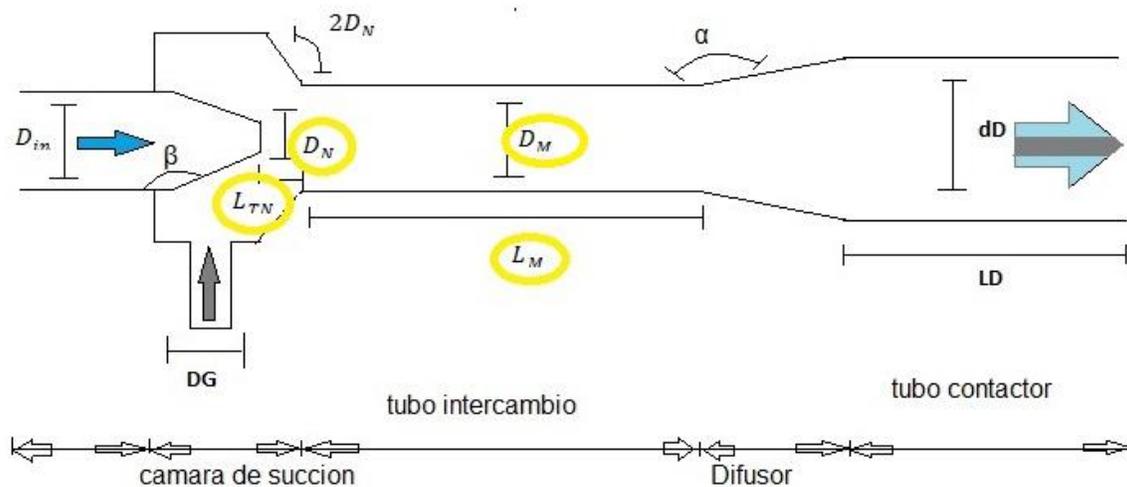
Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Sección III. En esta sección, el flujo de dos fases se transforma en un flujo de microburbujas o flujo espuma homogéneo, una vez superada la región de choque o de mezcla [1]. Esta transición de patrón de flujo se acompaña de una súbita acumulación de presión; una parte de la energía cinética del flujo se disipa en el choque y se desarrolla la dispersión gas/líquido aguas abajo de la sección II, ambas fases fluyen homogéneamente a través de la parte restante del eyector creando una dispersión secundaria de burbujas en el fluido a granel del recipiente del reactor o fase III.

1.3.3 Dimensiones estructurales de un eductor.

Como se muestra en la Figura 14, el eyector tiene dos entradas y una salida generalizada para los modelos de este tipo, el fluido de trabajo (agua) se suministra a diferentes presiones dependiendo de su diseño y el sector en el que se pretende aplicar por la sección de entrada principal D_{in} , mientras que el fluido secundario es arrastrado a través de la entrada D_G por succión o también a presión dependiendo de su aplicación.

Figura 14 dimensionamiento estructural de un eductor.



Fuente: Propia.

A continuación se plantean las ecuaciones para dimensionar los componentes de las secciones críticas de un eyector encontradas en la literatura de modelos estudiados basados en estudios de laboratorio y estudios empíricos con los cuales se ha logrado mostrar un desempeño óptimo del comportamiento de los dispositivos Venturi utilizados para la generación de microburbujas y el coeficiente de transferencia de masa volumétrica.

Las secciones más importantes en el estudio y diseño de un generador de microburbujas son:

Ángulo de contracción de entrada de garganta (β) y el ángulo de difusión de salida de tubo de esparcimiento (α).

Como un gran número de investigadores han informado, 20° y 8° son valores óptimos para el ángulo de contracción de entrada de garganta y el ángulo de difusión de salida de tubo de expansión, respectivamente [3],[32].

Diámetro de la boquilla (D_N)

$$D_N = \sqrt{\frac{4Q_0}{\pi\mu_1\sqrt{2g\frac{\Delta P_0}{\gamma}}}} \quad (1)$$

Donde

D_N = diámetro de la boquilla

Q_0 = volumen del chorro de la boquilla

μ_1 = coeficiente del caudal

ΔP_0 = diferencial de presión

γ = densidad del agua

Fuente: tomado de [3]

Diámetro de la garganta (D_M)

$$M_0 = \frac{A_M}{A_N} = \left(\frac{D_M}{D_N}\right)^2 \quad (2)$$
$$D_M = \sqrt{M_0 D_N}$$

Donde

M_0 = relación de área garganta boquilla

A_M = área de la garganta

A_N = área de la boquilla

D_M = diámetro de la garganta

D_N = diámetro de la boquilla

Fuente: tomado de [3].

Longitud de la garganta (L_M)

La longitud de la garganta es un factor bastante ambivalente. Por un lado, la garganta debe ser lo suficientemente larga como para garantizar una mezcla suficiente. Por otra parte, debe ser lo más corto posible para reducir las pérdidas por fricción en el fluido. Así, muchos experimentos bajo diferentes relaciones de área, longitud de garganta y presión operativa han indicado que la longitud óptima es una función relacionada con la relación de área. En [3] se obtuvo una expresión óptima mediante análisis de regresión de los datos experimentales.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

$$L_M = (7.77 + 2.42M_0) dM \quad (3)$$

Donde

L_M = longitud de la garganta

M_0 = relación de área garganta boquilla

D_M = diámetro de la garganta

Fuente: tomado de [3]

Distancia entre la boquilla y la garganta

La relación de este parámetro influye en el rendimiento del generador de burbujas, la literatura hace referencia que existe un valor óptimo para el espaciado entre la garganta y la boquilla, el volumen de succión y la calidad de las burbujas generadas [3],[27], [31].

$$L_{TN} = (0.5 \mp 1) D_N \quad (4)$$

Donde

L_{TN} = distancia entre la boquilla y la garganta

D_N = diámetro de la boquilla

Fuente: tomado de [3]

1.4 Estado del arte sobre eductores.

Como parte de la aproximación metodológica al tema del mejoramiento de las boquillas en búsqueda de un mejoramiento en la eficiencia del sistema Ecoflot, en este trabajo se realizó una búsqueda acerca de: 1) patentes de eductores, con el fin de identificar si existen invenciones que muestren que es relevante considerar al eyector como elemento objetivo de estudio; y 2) trabajos reportados en la literatura donde se utilicen eductores como elementos para la generación de microburbujas, con el fin de identificar si existe relación entre el diseño del eductor y la eficiencia del proceso de producción de microburbujas.

Por razones de espacio, toda esta información bibliográfica se ha recopilado en el Anexo A de esta monografía, y se resume a continuación las principales conclusiones obtenidas de este estudio.

1. Existen numerosas patentes de eductores, de las cuales se examinaron aquellas cuyo objetivo es la generación de burbujas. Todas usan el mismo principio físico, sin embargo los cambios estructurales en cuanto a diámetros, longitudes de las secciones, áreas de mezcla, inclusión de pequeñas ranuras, entre otras, muestran un impacto importante en la capacidad de producción de burbujas en cuanto a tamaño, número y forma de las burbujas,

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

y en consecuencia un impacto importante en la separación de materiales por la técnica de flotación.

2. La existencia de numerosas patentes y el reporte del uso común de eductores en el proceso de flotación para tratamiento de grandes volúmenes de materiales en industria petrolera muestra que éste sistema ofrece ventajas significativas frente a otros dispositivos para generación de burbujas por cuanto: 1) no requieren de una fuente de energía costosa tal como la energía eléctrica, 2) son robustas en cuanto a que su composición física no requiere de un mantenimiento especial, tienen poco desgaste de materiales, pueden funcionar en tanques de volúmenes elevados de agua a ser tratada ya que no son influenciados notablemente por las grandes presiones del material a ser tratado en el tanque, como si ocurre con el uso de polímeros o materiales elásticos porosos, los cuales son adecuados en volúmenes pequeños.
3. Los estudios del comportamiento de la formación de burbujas y su relación con la estructura de los eductores ha sido un tema de gran interés investigativo, mostrando la necesidad del uso de herramientas computacionales especializadas para el análisis de fluidos y la combinación con bancos de prueba experimentales. El modelado analítico es extremadamente complejo, y aunque se encuentran modelos basados en balances de energía y de masa, éstos solo dan cuenta de las relaciones entre caudales, velocidades y presiones de los dos flujos. En la presencia de detalles tales como el uso de ranuras que facilitan el rompimiento del material a tratar, estos balances energéticos no permiten describir este tipo de fenómenos. Todos los reportes de mejoramiento de eficiencia de separación de materiales parten de un modelado por computador del sistema de generación de burbujas, a partir del cual se pueden establecer las relaciones adecuadas para el tratamiento de materiales con propiedades físico químicas específicas.
4. A pesar de las numerosas investigaciones que se han llevado a cabo referente a los eductores como generadores de microburbujas, la literatura sigue siendo sesgada, debido a las bases empíricas que en la mayoría de los casos se usan para formular y construir los dispositivos.
5. El proceso de generación de burbujas depende no solo de las presiones, diámetros de tubería y caudales que son los datos proporcionados por los fabricantes de eductores. El problema de mezclado multifase es extremadamente complejo de describir analíticamente, y la producción de burbujas pasa a depender en este tipo de mezclas también de propiedades tales como temperatura, viscosidad, parámetros de los fluidos. Se concluye que previo a una implementación es imprescindible contar con una fase de simulación computacional de análisis de fluidos, ya que un mismo eductor que genera un buen número de burbujas con un tamaño adecuado en un sistema particular, puede no producir burbujas o producirlas en tamaños no adecuados en un sistema diferente.

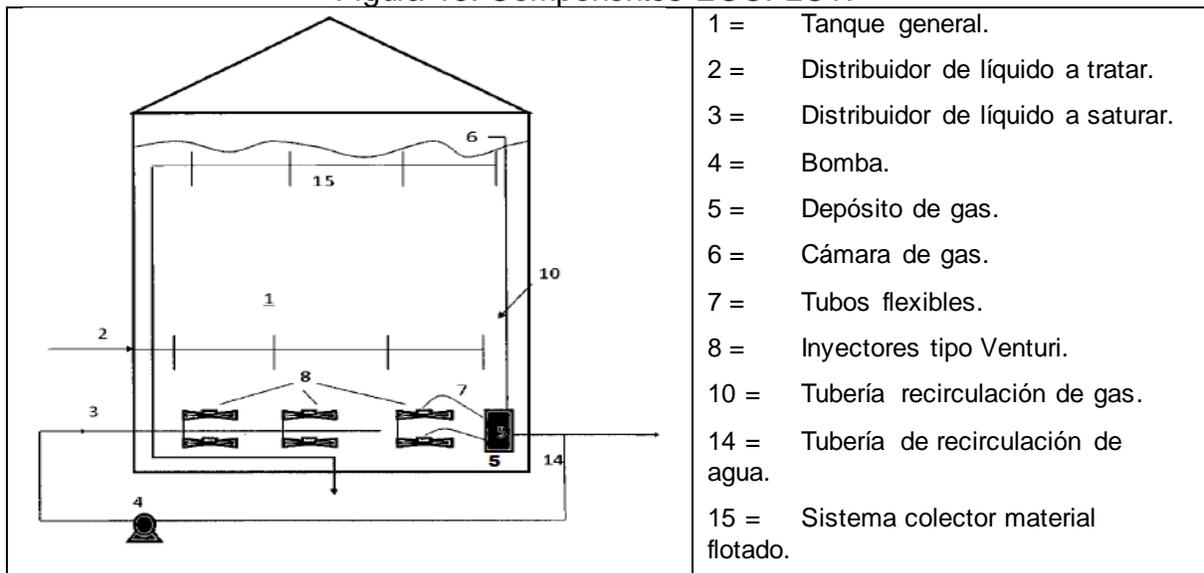
CAPITULO 2

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ECOFLOT.

El Ecoflot es una invención basada en celdas de flotación, implementada para mejorar la separación de sólidos suspendidos, grasa y aceite en procesos de tratamiento de aguas de producción, se aplica en campos de producción de crudo, gas y otras industrias, y trabaja mediante flotación inducida con aire o gas inerte, para evitar la corrosión de las tuberías de transporte de material [33].

El sistema de flotación está montado en un tanque que trabaja a presión atmosférica para que los efluentes del proceso de extracción petrolera puedan continuar su curso normal dentro del proceso de disposición final de las corrientes tratadas. El equipo para su funcionamiento cuenta con un sistema de generación de burbujas, compuesto por un entramado de boquillas que están distribuidas de tal forma que cubra toda el área circular inferior del tanque y de esta manera se garantiza la flotación de los sólidos suspendidos y el aceite que viene en la corriente de entrada. El diseño conceptual de la patente ECOFLOT utilizada en los procesos de tratamiento de aguas de producción, está dimensionado teniendo en cuenta las características del agua a tratar, como los criterios para alcanzar los tamaños de burbujas idóneos para generar un sistema de flotación con los inyectores tipo Venturi. Figura 15.

Figura 15. Componentes ECOFLOT.



Fuente: Modificado de [33].

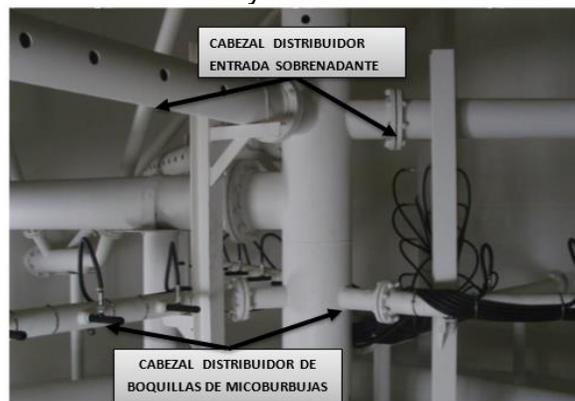
2.1 Objetivo del sistema ecoflot.

El sistema ECOFLOT corresponde a un equipo para el proceso de tratamiento de agua de producción, pertenece a una etapa intermedia de tratamiento enfocada en el retiro de sólidos suspendidos y grasas. El Ecoflot opera de manera similar a otros equipos de flotación por inducción de aire o gas (IGF) ampliamente utilizados en la industria, pero tiene como ventaja su bajo costo de inversión, bajos costos de mantenimiento, bajos consumo de energía y alta eficiencia de remoción de grasas y sólidos suspendidos[34].

2.2 Condiciones de operación.

Haciendo una descripción desde los componentes más generales y de mayor tamaño hasta los más específicos y de menor dimensión, puede considerarse que el primer elemento es el “tanque de recepción y tratamiento”, que puede tener una capacidad entre 100 m³ y 15.000 m³; el siguiente componente es el “distribuidor de líquido a tratar”, que es un arreglo de tuberías perforadas (distribuidas uniformemente con el objetivo de asegurar una correcta distribución del líquido y un contacto homogéneo con las burbujas provenientes del distribuidor, el diámetro de las tuberías oscila entre 2,54 y 50,8 cm, las perforaciones tienen un diámetro entre 2 y 4 cm); posteriormente se encuentra el “distribuidor de líquido a saturar”, conectado a una bomba para proporcionar fluido a presión, este distribuidor consta de una tubería principal con un diámetro que oscila entre 5 y 31 cm, posee unas derivaciones con diámetros entre 2 y 15 cm, en estas derivaciones se acoplan inyectoros tipo Venturi a intervalos regulares (el número de inyectoros por derivación es de 2 a 6 y tienen un diámetro de 2 a 4 cm), como se ilustra en la (Ver Figura 16) [34].

Figura 16. Distribución de líquido a tratar, líquido a saturar, tuberías flexibles e inyectoros.



Fuente: Modificada de [34].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

El siguiente componente es un “depósito de gas” sumergido en el fondo del tanque y que contiene gas proveniente de la cámara de gas del tanque más grande, el gas es proporcionado a los inyectores a través de tuberías flexibles. Cabe resaltar que la presión dentro del distribuidor debe ser máxima de 6 atmosferas y los inyectores se distribuyen a lo largo de cada derivación de manera que la caída de presión entre el primero y el ultimo no exceda el 10% de presión promedio, el contenedor tiene una capacidad que garantiza un suministro de gas por un periodo de 2 a 5 minutos así como también estabilidad en la presión de cada uno de los inyectores tipo Venturi [34].

Las siguientes son algunas consideraciones importantes:

- La presión del fluido en los inyectores junto con la presión del gas proveniente del depósito es tal que asegura una formación de burbujas con un diámetro de 200 a 300 μm y una densidad de 0,5 a $1 \cdot 10^4$ burbujas por cm^3 de líquido saturada, por ello la presión en el distribuidor de líquido a saturar con gas debe estar entre 101,3 KPa y 1013 KPa.
- El distribuidor de líquido a saturar es alimentado por un sistema de recirculación (bomba impulsora) que consiste de una tubería que toma líquido de la parte inferior del tanque.
- El método combina 2 técnicas importantes de flotación, DAF e IAF, obteniendo como resultado un método altamente eficiente.
- Además de los componentes mencionados, el sistema cuenta con un “acondicionamiento de desborde” (tuberías y control de nivel incluido, ver Figura 17) y una adecuación de “desnatado” para retirar las impurezas capturadas.

Figura 17. Control de nivel.

a) Flotador de bajo nivel. b) Flotador de alto nivel.



a)

b)

Fuente: Tomado de [34].

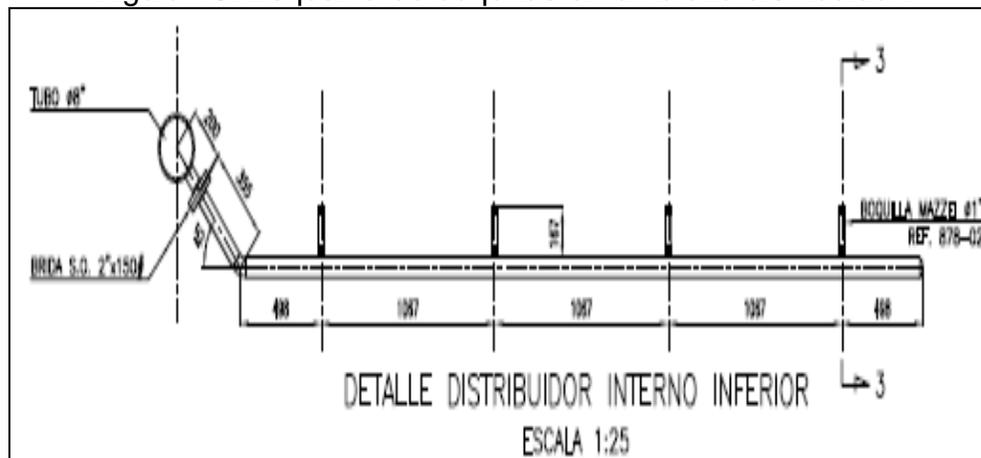
2.2.1 Boquillas

El sistema ECOFLOT utiliza una serie de boquillas inyectoras de gas o aire, las cuales están distribuidas en un cabezal interior (ver Figura 18), cuya finalidad es contactar el volumen de agua para tratamiento.

Debido a que las boquillas operan por efecto Venturi, se debe garantizar un diferencial de presión suficiente que les permita generar el vacío adecuado, para que se incorpore el gas a la corriente de agua y se produzcan las burbujas finamente dispersas que faciliten el efecto de la flotación.

En la Figura 18 se observar la distribución de las boquillas en el brazo de distribución.

Figura 18. Esquema de boquillas en un brazo distribuidor.



Fuente: Tomada de [34].

Las boquillas son suministradas por el fabricante “Mazzei”, quien proporciona la respectiva tabla de diseño (información necesaria para establecer cuál de ellos cumple los requerimientos del proceso). Revisadas las condiciones de operación en la tabla entregada por el fabricante, la boquilla modelo 484 de 3/4 in de diámetro con delta de presión de 5 psig y caudal requerido de 1,6 (GPM) cumple los requerimientos de succión que necesita el proceso de 1.2 ft³/h (se tiene en cuenta la cantidad de aire y/o gas a utilizar en el proceso, el caudal de recirculación y el delta de presión). La Tabla 2 presenta las condiciones de operación de las boquillas

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Tabla 2. Condiciones de operación de las boquillas Mazzei.

Presion de Operación (psig)		Model 484X 3/4 in	
Entrada	Salida	Flujo (GPM)	Suction (SCFH)
10	0	1.6	13.1
	2		3.9
	5		1.2
	7		0.4
	8		

Fuente: Tomada de [34].

En la Tabla 3 muestra el caudal y velocidad de cada boquilla.

Tabla 3. Caudal y velocidad de cada boquilla.

BOQUILLAS	CAUDAL	VELOCIDAD
O1	388.03	6.76
O4	269.68	4.70
O3	200.88	3.50
O4	166.28	2.90

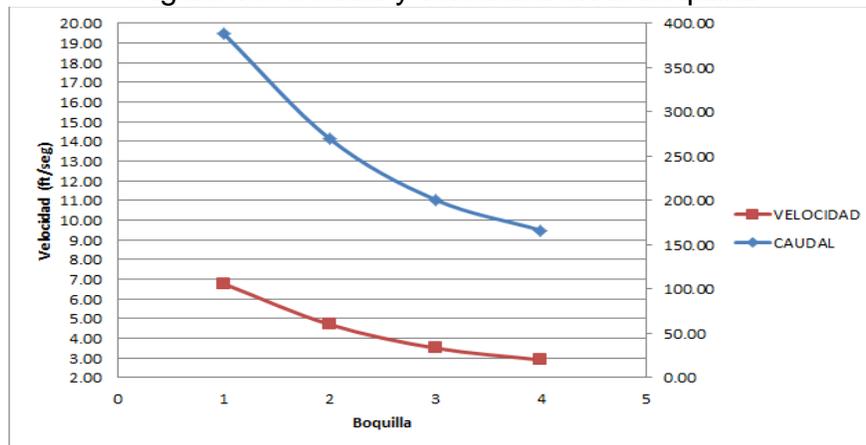
Fuente: Tomada de [34].

2.2.2 Sistema de Inyección de Gas

Para las condiciones de operación de un tanque ECOFLOT de capacidad nominal de 20.000 BWPD, se cuenta con un arreglo de 16 boquillas para llevar a cabo la inyección del caudal de agua-gas, cada una con un aporte de aire o gas de inyección de 1,21844 ft³/hr. En la Figura 19, se muestra la velocidad y el caudal de las 4 primeras boquillas instaladas para tratar 20 KBWPD.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Figura 19. Caudal y velocidad en la boquilla.



Fuente: Tomada de [34].

Las boquillas del modelo 484, fabricadas por la empresa Mazzei, son alimentadas con una presión de entrada de 10 psig, caudal de flujo 1,6 (ft³/hr), un delta de presión de 5 psig a la salida, para generar una succión de 1,2 (ft³/h). En la Figura 20 se muestra una boquilla instalada en el cabezal de distribución de las boquillas en la sección interna del tanque de procesamiento[34].

Figura 20. Boquilla instalada en cabezal.



Fuente: Tomada de [34].

2.2.3 Datos tamaños de burbujas

El sistema Ecoflot tiene como base de diseño una distribución de burbujas de aire y/o gas dispersa en el agua de tratamiento que oscilan en tamaños de 45 μ m, 200 μ m y 360 μ m. Con estas dimensiones se garantiza la remoción eficiente de las partículas de aceite y minerales suspendidas en el agua a tratar[34].

- Tamaño Promedio (P50): 200 μ m
- Tamaño menor (P10): 45 μ m
- Tamaño mayor (P90): 360 μ m

CAPITULO 3

FACTORES QUE INCIDEN EN LA EFICIENCIA DE SEPARACIÓN CRUDO/AGUA.

El método de generación de burbujas es la parte fundamental del sistema de flotación, se realiza mediante generadores internos o externos, que buscan mejorar la producción del “enjambre de burbujas” y el tamaño de las mismas; el procedimiento de generación de éstas, lleva a la clasificación ya sea “Disuelto” (DAF) o “Inducido” (IAF). Es necesario recordar que en el sistema DAF, una porción de agua previamente tratada es saturada con aire/gas para posteriormente ser introducida a una celda de flotación; en el sistema IAF, la burbuja es dispersada en la corriente a tratar.

Para la optimización del proceso de flotación es indispensable tener en cuenta el diseño de los componentes estructurales como también el dimensionamiento de las variables físicas que rigen el proceso, para lo cual es pertinente plantear una segmentación del sistema de flotación, para este caso hay que hacer relevancia en la estructura del dispositivo generador de micro burbujas (tubo Venturi), su dimensionamiento de sus secciones internas y alimentación de este mediante agua y succión de aire/gas, como también propiedades de los fluidos a tratar, ph, temperatura, viscosidad y densidad. De igual manera, el diseño del tanque o cámara de flotación está directamente relacionada con la eficiencia del sistema conjunto de flotación, y las condiciones propias del almacenamiento del fluido a tratar, presión, fuerzas inerciales, cantidad de partículas sólidas, cantidad de aceite, sales, laminaridad, viscosidad. Por lo anteriormente estipulado se generan una cantidad de factores que repercuten en la eficiencia y costos de separación mediante la técnica de flotación.

Sin embargo como síntesis los mecanismos de flotación, básicamente están constituidos por las siguientes etapas:

- Generación de burbujas en el agua a tratar.
- Contacto entre las burbujas de gas y la partícula o gota de aceite suspendido en el agua.
- Adherencia de la partícula o gota de aceite a la burbuja de gas.
- Elevación de la combinación de la mezcla aire/sólido, a la superficie donde el material flotante es removido.

3.1 Generación de micro-burbujas mediante sistema Venturi

La generación de las microburbujas mediante un sistema eductor son consecuencia de un rediseño estructural de un dispositivo Venturi convencional, su gran diferencia radica en las dimensiones del diámetro de la tobera y la distancia entre esta con la sección de mezcla[4], de igual manera el diámetro y el largo de la sección de intercambio son factores claves para generar burbujas de tamaños ideales para la flotación de partículas de diámetros pequeños [1],[35]. Sin dejar de lado que la velocidad y caudales de alimentación del dispositivo tienen una relación directa con las dimensiones internas, por ende se modelan los eyectores teniendo en cuenta estos tres factores.

La cantidad de burbujas, velocidad y tamaños están profundamente afectadas por el tipo de generador de burbujas, la velocidad superficial del gas[36],[37] .

3.1.1 Parámetros geométricos del generador

Tamaño de la boquilla

La mayoría de autores tienen en sus estudios variaciones estructurales muy marcadas en sus diferentes prototipos estudiados, este fenómeno corrobora que cada investigación cuenta con un alto grado de respaldo teórico e empírico, siendo las dimensiones del diámetro de la boquilla un factor relevante, puesto que de esta reducción depende la velocidad, caudal y presión ejercida por el chorro que alcanza la garganta del generador, para así lograr la succión de la fase gaseosa teniendo en cuenta que si la velocidad es muy pequeña no se genera la succión ideal de la fase gaseosa, si la cantidad de este segundo fluido es muy baja no se logra el enriquecimiento líquido/gas ideal debido a la poca velocidad interfacial del gas, y por consiguiente una baja dispersión de micro burbujas en el sistema de flotación, en la Figura 21 se observa cómo influye la velocidad del chorro en la succión del segundo fluido. Para el trabajo desarrollado por Lijun Wang y Yan Jia [4] quienes en su diseño utilizaron agua y aire como fluidos a condiciones ideales de temperatura velocidad de fluido motor de 7.78 m/s y una relación de distancia boquilla a tubo de mezcla 1.5 a 2.5 mm.

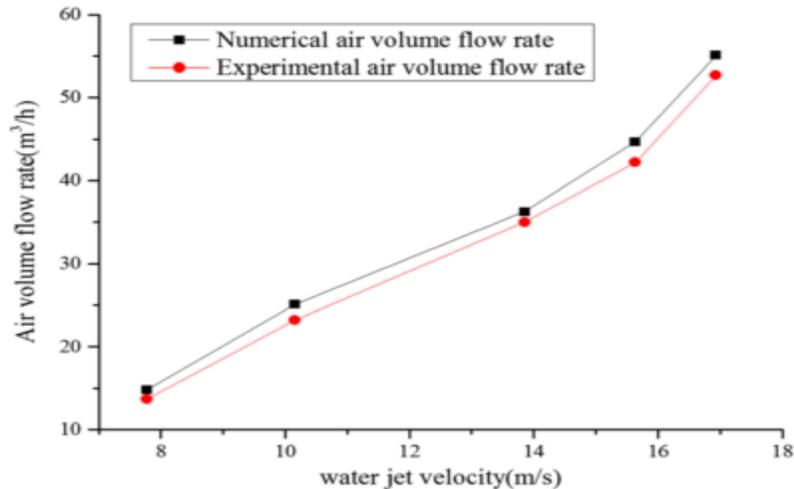
Distancia boquilla garganta

En varios trabajos se discute el valor apropiado del espaciado adimensional de boquilla a garganta, sin embargo se ha logrado recrear experimentalmente y con parámetros adimensionales de diseño, que hay una relación entre los valores de garganta y la cantidad de aire succionado, como se muestra en la Figura 22 donde

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

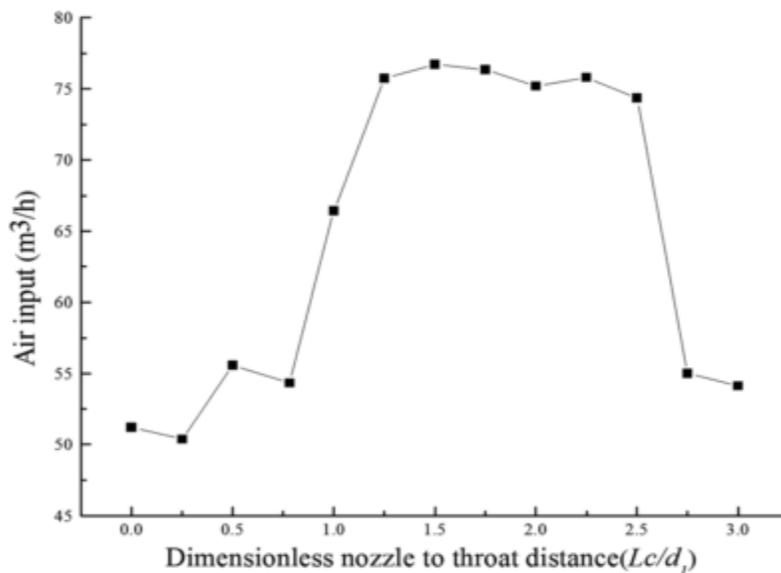
se observa que existe un intervalo en para el cual se mantiene una concordancia entre diámetro y cantidad de fluido arrastrado. Con referencia a la Figura 14, definiendo el parámetro adimensional $L_d = LTN/DN$, a medida que aumenta el L_d , el caudal de succión de aire aumenta y cuando $L_d \leq 1,25$, y este valor alcanza un máximo y se mantiene estable cuando $1,25 < L_d \leq 2,5$ y luego disminuye cuando $L_d > 2,5$. [4]

Figura 21. Succión de aire para diferentes velocidades de chorro de agua.



Fuente: Tomado de [4].

Figura 22 Relación entre los valores de garganta y la cantidad de aire succionado.



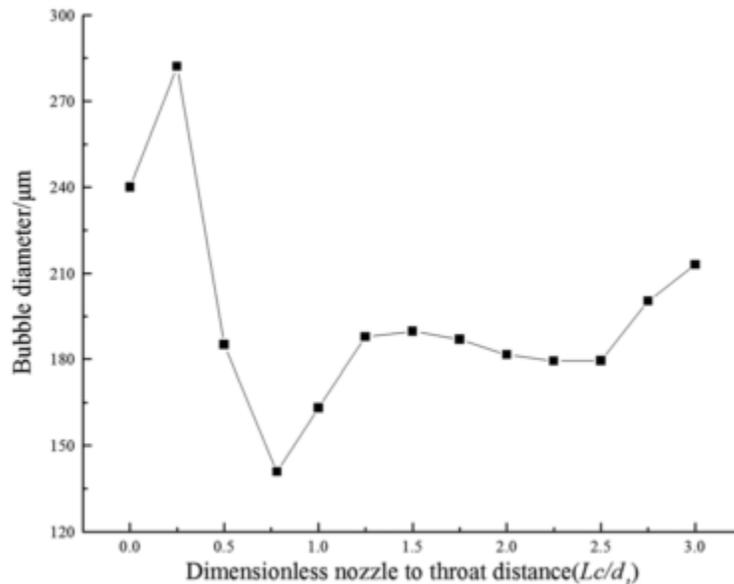
Fuente: Tomado de [4].

Sin embargo no solo el caudal volumétrico de gas es el único afectado por este parámetro, es posible evidenciar que también relaciona el tamaño y la distribución

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

de las burbujas. Por lo tanto, es necesario encontrar el espaciado de boquilla a garganta adecuado para el generador de microburbujas, como se muestra en la Figura 23.

Figura 23 Relación espaciado de boquilla a garganta para el generador de microburbujas.



Fuente: Tomado de [4].

Dimensiones de garganta o tubo mezclador

El dimensionamiento del conducto mezclado es clave en el rendimiento del eyector, puesto que es en algún punto de esta sección que se encuentra la ubicación de la zona de choque de mezcla. El rendimiento óptimo de dispersión se consigue cuando el chorro de líquido se rompe justo al final de la zona de mezcla. Si la desintegración del chorro se produce antes, el flujo de la mezcla homogénea de gas-líquido a través de la parte restante de la sección de mezcla dará lugar a pérdidas excesivas por fricción. Por otro lado, si el tubo mezclador es demasiado corto, el chorro no se rompe y, en consecuencia, no se produce el transporte de momento entre las fases. Como resultado, la eficiencia del eyector disminuye abruptamente. Obviamente, la aparición del desprendimiento del chorro y la posición de la zona de choque dependen del caudal de gas y líquido y de los parámetros del eyector tales como la longitud [1].

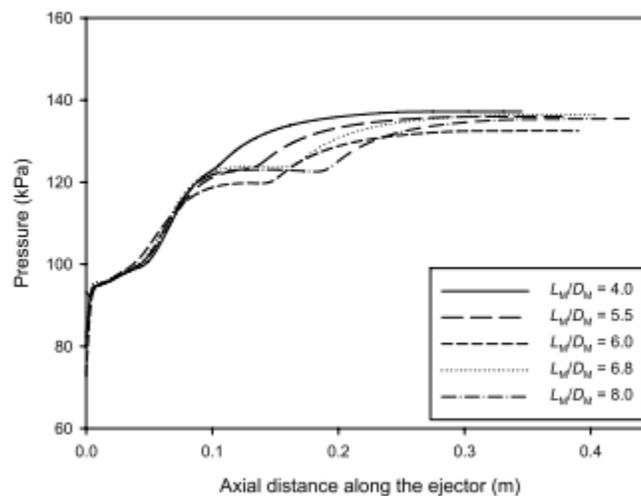
Por lo tanto, si el flujo de gas se incrementa a valores más altos, el desprendimiento de chorro no puede ocurrir en el tubo mezclador, pero puede ocurrir en el difusor o en el conducto de aspiración. Cuando el desprendimiento del chorro se produce en

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

el difusor o en la unidad de aspiración, el coeficiente de transferencia de masa disminuirá [38][1].

En el trabajo de Tony Utomo, Zhenhua Jin [1]. La Figura 24 muestra la variación de la presión a lo largo de la línea central del eyector desde la salida de la boquilla hasta el final del eyector para diferentes relaciones de longitud diámetro y caudal, observando que al final del eductor para cualquier relación la presión es idéntica. En esta investigación los autores también utilizaron agua y aire como fluido principal y secundario para llevar a cabo el proceso de simulación, para diferentes relaciones de caudal de gas/líquido y diámetros de la sección de mezcla.

Figura 24 La influencia de la longitud del tubo mezclador.



Fuente : Tomado de [1].

La súbita acumulación de presión también se inicia casi en el mismo lugar. Por consiguiente, el lugar donde se inicia el choque de mezcla está situado en la misma posición, independientemente de la longitud del tubo mezclador [1].

3.1.2 Factor fluido/físico dentro del generador

Diámetro de burbujas

El diámetro de la burbuja es un criterio de juicio tanto para el desempeño del sistema de flotación como para la selección y diseño del dispositivo generador puesto que del tamaño de estas aumenta la probabilidad de captura de partículas finas en flotación. Para el generador de microburbujas, hay dos parámetros que afectan al diámetro de la burbuja: la tensión superficial y la velocidad media de disipación de energía cinética turbulenta [4]. Una pequeña tensión superficial y una gran velocidad

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

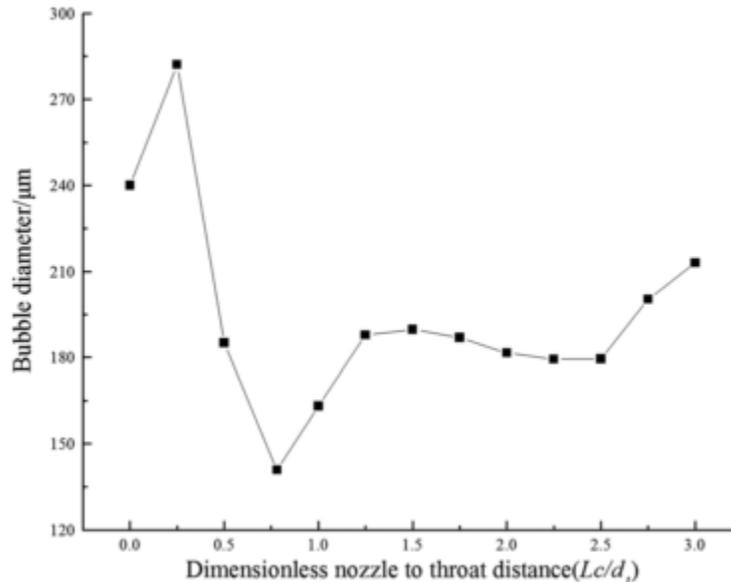
de disipación de energía cinética turbulenta pueden dar lugar a un pequeño tamaño de burbuja.

El diámetro de la burbuja dentro del flujo de un fluido se puede calcular por [39],[4]:

$$d_b = 0.725 \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{0.6} \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{0.4} \quad (5)$$

Donde ρ es la densidad del agua y σ es la tensión superficial. ε es la velocidad de disipación de energía cinética turbulenta. Para diferentes L_d , el resultado estadístico del diámetro de la burbuja en toda la sección del generador se muestra en la Figura 25.

Figura 25 Diámetro de la burbuja en toda la sección del generador.



Fuente: Tomado de [4].

El diámetro de la burbuja es mayor que 180 μm cuando $L_d \leq 0,5$ y $L_d > 2,5$. El diámetro de burbuja más pequeño es de aproximadamente 140 μm cuando $L_d = 0,75$ y el diámetro de burbuja varía de 180 a 190 μm cuando $1,25 \leq L_d \leq 2,5$. Por lo tanto, con respecto al diámetro de la burbuja, $0,5 \leq L_d \leq 2,5$. Es el rango recomendado[4].

Coefficiente volumétrico de transferencia de masa

Respecto a este parámetro hay una discordancia entre la comunidad investigativa, entre los que plantean que la longitud de la sección de mezcla no tiene repercusión [40] y quienes según sus experimentos encontraron el hecho contrario que el

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

coeficiente de transferencia de masa volumétrica fue influenciado por la longitud del tubo mezclador[35], [1]. Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar una mejor comprensión de la hidrodinámica de los sistemas eyectores para estudiar dicho comportamiento.

Por este motivo se encontró en la literatura que teniendo en cuenta la relación Q_G/Q_L se puede establecer la velocidad de aire en un rango de 0.2-1.2 m³/h, con esta relación se pretende mantener los régimen de flujo burbujeante dentro del eyector[40], y mediante estos resultados experimentales, recomiendan correlaciones empíricas para calcular el coeficiente de transferencia de masa para un eyector de flujo[1],[40].

$$K_L a = 5.4 * 10^{-3} \epsilon^{0.66} \epsilon_G \left(\frac{D_N}{D_D}\right)^{0.66} \quad (6)$$

Con

ϵ = Velocidad de disipación de energía cinética turbulenta.

ϵ_G = Fracción de gas

D_D = Diámetro del Difusor.

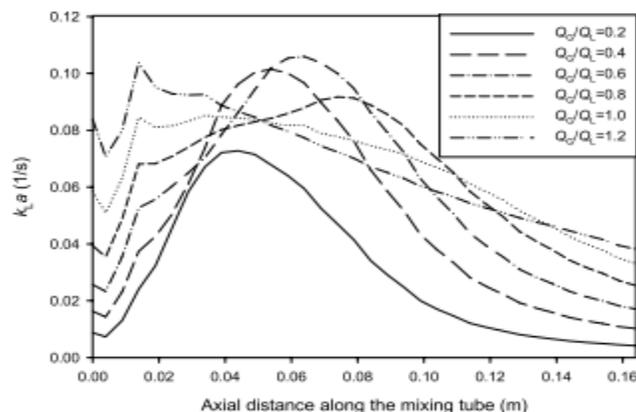
D_N = Diámetro de la Boquilla

Donde:

$$\epsilon_G = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} \quad (7)$$

Sin embargo, Llevado a cabo variaciones de diseño y probadas en plantas piloto se demostró que el choque de mezcla se da en lugares distintos dentro de la sección de intercambio, ver Figura 26. Por lo tanto, el volumen del choque de mezcla y la dispersión depende de la longitud del tubo por lo tanto, el coeficiente de transferencia de masa también varía[1].

Figura 26 Coeficiente de transferencia de masa volumétrica tubo mezclador varios Q_G / Q_L .



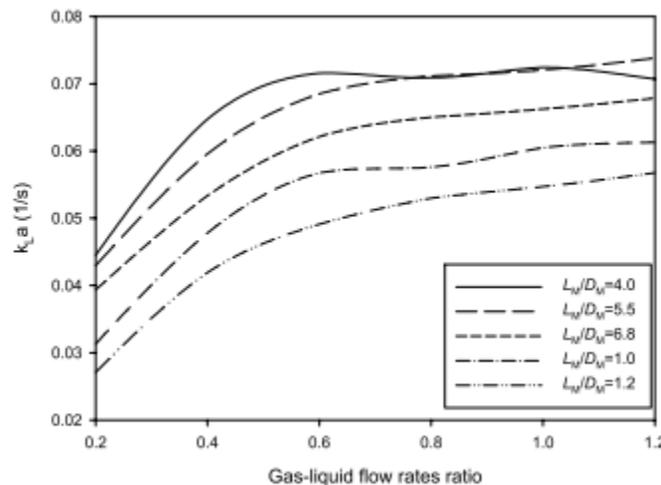
Fuente :Tomado de [1].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

La grafica evidencia que al realizar variaciones de caudal para las dos fases el coeficiente de transferencia de masa volumétrica está inversamente relacionado con la distribución de la tasa de disipación de energía, ver Figura 26 este fenómeno se debe al hecho de que el coeficiente de transferencia de masa volumétrica depende no sólo de la tasa de disipación de energía, sino también de la fracción de gas[1].

También se observa en la Figura 27 que la dimensión del tubo de mezcla interfiere claramente en el coeficiente de transferencia de masa volumétrico, puesto que una región de mezcla más largo crea un porcentaje bajo en comparación con un corta y que esta variación se evidencia en cualquier proporción de alimentación de flujo de gas líquido.

Figura 27 Influencia de la longitud del tubo mezclador sobre el coeficiente de transferencia de masa volumétrica.



Fuente :Tomado de [1].

Tamaño y cantidad de las burbujas

La eficiencia de las burbujas para atrapar las partículas y luego ascender hasta la superficie, depende de múltiples fenómenos que ocurren dentro del sistema de flotación. El tamaño medio de las burbujas y su distribución de tamaños son importantes en la flotación, debido a su efecto en la eficiencia de la colección y transporte de partículas[8]. La baja recolección se debe a las propiedades intrínsecas de las partículas (gotas con masa muy pequeña y baja inercia) y los inconvenientes principales en el proceso de flotación están relacionados con la baja probabilidad de captura de partículas por las burbujas[8] por lo que se hace necesaria la generación de muchas burbujas por unidad de tiempo las que deben cubrir la totalidad del área interna del tanque de flotación, y el tamaño de estas

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

debe ser de diámetros micrométricos, de tal manera que muchas micro burbujas hagan contacto con las partículas generando una especie de colchón que mejore la acción de empuje hacia la superficie. Este fenómeno se estudia en la sección (3.3.1) proceso de adhesión.

Sin embargo lo anteriormente planteado recae directamente en la acción del eyector pues de este dependen factores como las distribuciones del tamaño de la burbuja, la correlación para el arrastre, el diámetro de la burbuja, la fuerza de arrastre y la retención de gas, y los factores que afectan al tamaño de la burbuja [2].

La medición del tamaño de la burbuja es un problema crítico. Algunos investigadores proponen que el régimen sea homogéneo y se encuentra a velocidades de gas relativamente bajas, caracterizando una estrecha distribución de tamaño de burbuja y retención de gas radialmente uniforme siendo el efecto deseable para aplicaciones prácticas, porque ofrece una gran área de contacto [41].

Los investigadores logran evidenciar este comportamiento mediante arreglos de laboratorio en los que se instalan cámaras de alta definición para analizar la generación de la microburbujas y su comportamiento dentro de la columna de flotación, una vez la burbuja es expuesta a las fuerzas actuantes y propias de cada dispositivo de trabajo.

Sin embargo con la implementación de software computacional se recurre a la estadística mediante el diámetro medio de Sauter o Sauter mean diameter, quien plantea aproximar los diámetros de las microburbujas a un diámetro equivalente a pesar de que no es del todo cierto en un caso práctico, ya que no se encuentra en el régimen de burbujas distorsionadas o deformadas [41].

Forma de la burbuja

Cuando existen dos fluidos inmiscibles, estos forman una interfaz con la menor área posible (esto es resultado de que los sistemas tienden a buscar un estado de equilibrio con menor energía). Cuando concurre una pequeña porción de un fluido inmiscible en otro, la forma esférica es la óptima para la burbuja (la formación tipo esfera, ocurre cuando la fuerza dominante es la tensión interfacial). Cuando intervienen otras fuerzas, la burbuja se puede deformar, por ejemplo, una burbuja deja de ser esférica si las fuerzas inerciales dominan[42].

El flujo alrededor de un objeto no es un flujo homogéneo simple. Generalmente, además de un flujo cortante simple, existe un flujo extensional unidireccional en la estela y bidireccional en el frente. Debido a esto, no es sencillo describir los flujos. Sin embargo, considerando un número de Reynolds pequeño, se han logrado obtener soluciones analíticas. Este es uno de los problemas clásicos de mecánica de fluidos conocido como flujo lento (creeping flow)[42].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que compara los efectos inerciales con los efectos viscosos en un flujo. Un número pequeño de Reynolds, indica que los esfuerzos viscosos dominan el flujo [42].

Existen dos soluciones analíticas del flujo alrededor de una esfera. La diferencia entre las dos soluciones es la "condición de frontera" que se considera. La primera solución supone como condición de frontera, que en la interfaz no hay deslizamiento, esta suposición da origen a la ley de Stokes. El otro caso (segunda solución), es considerar que la interfaz se puede mover generando una circulación interna (se supone que los dos fluidos son inmiscibles y que la tensión superficial en la interfaz es suficiente para mantener la burbuja en forma esférica)[42].

Cuando una burbuja se somete a un flujo externo, esta se deforma hasta que los esfuerzos normales y cortantes lleguen a un equilibrio en la interfaz. Las formas que adquieren estas burbujas son limitadas en estado estacionario, ya que estas no pueden tener formas afiladas o esquinas debido a las fuerzas interfaciales, sin embargo, se hará una breve descripción de las burbujas esféricas, elipsoidales, casquete esférico o casquete elipsoidal.

- **Esféricas:** En general, las burbujas y las gotas se aproximan a una esfera, si la tensión interfacial y/o de las fuerzas viscosas son mucho más importantes que las fuerzas de inercia.
- **Elipsoidales:** Son aquellas burbujas y gotas que tengan una geometría construida por la rotación de una elipse alrededor de un diámetro principal con interfaz convexa alrededor de toda la superficie. Con frecuencia estas burbujas o gotas, no se corresponden exactamente con elipsoides perfectos. Por otra parte, las burbujas y las gotas elipsoidales comúnmente sufren deformaciones periódicas, lo que complica la caracterización de la forma.
- **Casquete esférico o casquete elipsoidal:** Son las burbujas que adoptan una forma plana o tienen una base cóncava. Estas tienen un aspecto de elipsoides cortados. Si tiene una base cóncava existe un término en inglés "dimpled" para referirse a esa forma, en castellano sería decir que tiene hoyuelos. Estas burbujas pueden tener faldones delgados y alargados.

La forma de la burbuja no solo depende de la velocidad terminal de ascenso, también tiene un papel importante en la transferencia de masa y de calor, así como su comportamiento de coalescencia. Por lo tanto, las propiedades físicas y dinámicas de una burbuja quedan caracterizadas con los números adimensionales de Reynolds, Eotvos y Morton de la burbuja y se clasifican como lo muestra la Tabla 4 [43]-[44].

- **El número de Reynolds** de la burbuja (8), entrega la relación entre la inercia y las fuerzas viscosas.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

- **El número de Eotvos** de la burbuja (9), principalmente entrega la relación entre el empuje y la tensión superficial.
- **El número de Morton** de la burbuja (10), está compuesto solamente por las propiedades de las especies involucradas, él se mantiene invariable aun cuando cambie el régimen de la burbuja; y como es sensiblemente dependiente de la viscosidad del medio líquido, en la literatura a veces se encuentra usado como la raíz cuarta de su valor.

$$Re = \frac{\rho * d_e * U}{\mu} \quad (8)$$

$$E_0 = \frac{g * \Delta\rho * d_e^2}{\sigma} \quad (9)$$

$$M = \frac{g * \mu^4 * \Delta\rho}{\rho^2 * \sigma^3} \quad (10)$$

Tal que:

- U = Velocidad de la burbuja.
 d_e = Diámetro de volumen de esfera equivalente.
 σ = Tensión de la interface.
 $\Delta\rho$ = Valor absoluto de la diferencia entre densidades.
 μ = Viscosidad de la fase continua.
 ρ = Densidad de la fase continua.

Tabla 4. Clasificación de burbujas.

Tipo de burbuja	Número de Eotvos	Número de Reynolds
Esféricas	$0,01 \leq E_{ob} \leq 1,$	$0,1 \leq Re_b \leq 10$
Elipsoidales	$0,2 \leq E_{ob} \leq 30,$	$1 \leq Re_b \leq 10.000$
Tapa esférica	$30 \leq E_{ob} \leq 1.000,$	$100 \leq Re_b \leq 100.000$
Con falda	$30 \leq E_{ob} \leq 1.000,$	$1 \leq Re_b \leq 100$

Fuente: tomado de [43].

El proceso de saturación agua/gas solubilidad

La saturación del fluido gas/ aire es una variable que interviene directamente en el sistema de tratamiento por flotación, por ende a mayor presión de saturación se

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

tiene una mayor cantidad de aire disuelto en el agua y mayor cantidad poblacional de burbujas futuras dispersas[45]. Como la eficiencia de los sistemas de flotación está directamente relacionada con el tamaño de las microburbujas y su homogeneidad, es preciso establecer una presión de alimentación a las boquillas óptima, por lo anteriormente planteado el proceso de flotación requiere de un estudio experimental individual para cada sistema en particular[46]. Sin embargo un parámetro manejado es la relación aire utilizado, siendo el valor de aire liberado por despresurización medido en la línea de realimentación y en la columna de flotación en (mg/l), esto conlleva a tener en cuenta la relación de la cantidad de aire en agua (cm³/L) la cual está relacionada con la presión atmosférica a varias temperaturas Tabla 5.

Tabla 5. Relación de la cantidad de aire en agua.

Temperatura.	Solubilidad del aire en agua a presión atmosférico (cm ³ /L)
0	29.2
10	22.8
20	18.7
30	15.7

Fuente: Tomado de [35].

Considerando la tabla anterior es pertinente la utilización de la ley de William Henry[35], quien propone que a una temperatura constante la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido[47], con esta consideración se efectúan valores de operación en la mayoría de sistemas de flotación en los cuales para intervalos de presión entre 2 y 6 atmosferas a una temperatura de 20 c la solubilidad del aire varía entre 1 y 2 veces su valor de saturación[46],[22].

Sin embargo como se mencionó en el apartado (3.1.1) para este caso que la saturación se lleva a cabo dentro del tubo eyector es preciso evaluar conjuntamente variables estructurales y de comportamientos propios de los fluidos, puesto que en conjunto se presentan fenómenos físicos que alteran o benefician el proceso de saturación, entre los fenómenos ocurridos se hace necesario prestar atención al chorro de fluido generado entre la cámara de intercambio y región de mezcla, pues este depende tanto del diámetro de la tobera, longitud y diámetro de la sección de mezcla y sobre el recaen principios tales como energía cinética, diferencial de presión, fenómeno de choque y transferencia de masa volumétrica.

La variación de uno de ellos desencadena comportamientos críticos, es el caso de la variación del diferencial presión, este está sujeto a las dimensiones del tubo de mezcla, si cae, una parte de la energía suministrada por el chorro se utiliza para superar esta caída de presión. Por lo tanto, la energía suministrada no se utiliza

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

eficazmente para mezclar ambas fases y Como resultado, el valor de energía se vuelve bajo, presentando variaciones en el flujo de chorro, y el punto de choque se anticipa o desplaza, en el caso particular de un desplazamiento hacia la sección de difusión provoca fenómenos de mezcla ineficaces de ambas fases.

Otro componente importante es la distancia (LTN) entre la tobera y el comienzo de la garganta, puesto que el enriquecimiento agua/ gas está relacionado también con la cantidad y velocidad de gas succionado. Ya que la cámara de absorción pequeña restringe el desarrollo de la capa límite o el efecto de arrastre, dando como resultado la mala mezcla de aire y agua[4].

Energía cinética dentro del chorro de líquido

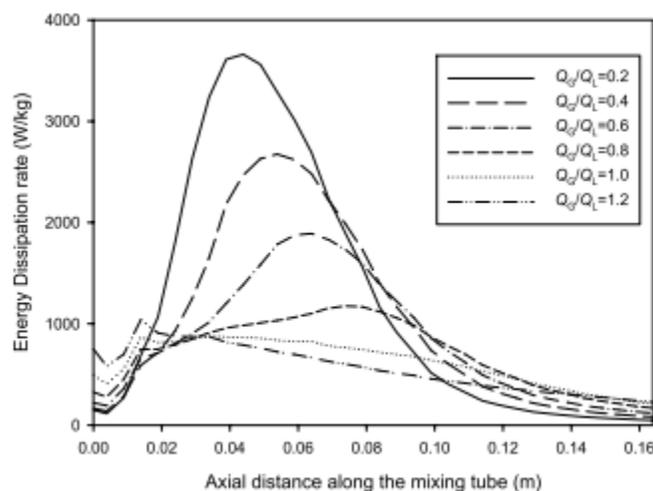
El chorro formado en la garganta del eductor es también directamente proporcional a la velocidad de entrada del flujo motriz, el diámetro de la tobera y el área de la garganta, estos parámetros proporcionan la energía cinética al chorro de líquido de alta velocidad para arrastrar la fase gaseosa y crear una dispersión fina de las dos fases.[1]

$$K_L a = 8.5 * 10^{-4} \epsilon^{0.66} \left(\frac{D_N}{D_n} \right)^{0.66} \quad (11)$$

Regímenes de flujo de chorro dentro del eyector[35]

La Figura 28 muestra el comportamiento de disipación de energía para varias relaciones de caudal a lo largo del dispositivo generador de microburbujas.

Figura 28 Distribución de la tasa de disipación de energía dentro del tubo de mezcla.



Fuente: Tomado de [1].

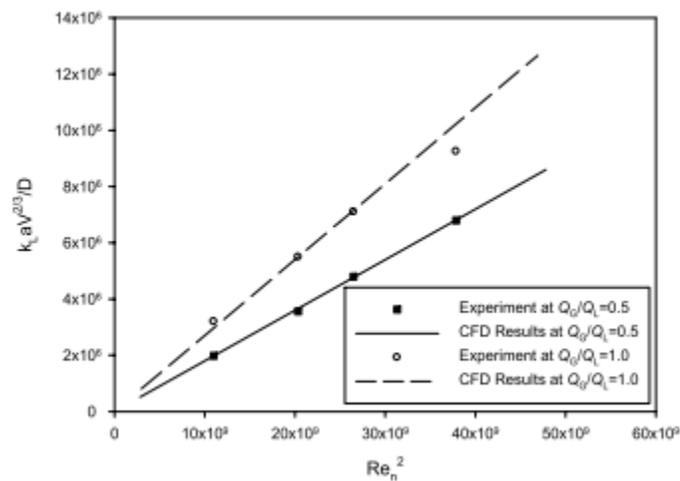
Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Se observa que para proporciones inferiores de caudal se alcanza mayor velocidad de disipación de energía y que a medida que aumenta el caudal se disminuye de igual manera ocurre respecto al incremento de la longitud axial del eyector, este fenómeno se relaciona con la localización del fenómeno de choque, en donde una parte de la energía cinética del flujo se disipa creando la dispersión gas-líquido.

Transferencia de masa y mezcla del eyector

La Figura 29 muestra la influencia del número de Reynolds en la boquilla para dos proporciones de caudal de alimentación sobre el número de transferencia de masa en el eyector[1] [48].

Figura 29. Influencia del número de Reynolds sobre la transferencia de masa.



Fuente: Tomado de [1].

Se evidencia que existe una relación estable sobre la transferencia de masa inicialmente para los dos valores de caudal y a medida que se va aumentando el número de Reynolds se genera una diferencia del caudal de mayor volumen respecto al de menor valor, sin embargo se puede catalogar como una transferencia de masa proporcional, que representa la característica hidrodinámica del eyector[40],[35], [1].

3.2 Cálculo de la eficiencia de un eductor

En el trabajo propuesto por Fredrik Liknes [5] plantea que desde el punto de vista energético, un eductor puede verse como una bomba cuyo objetivo es tomar un flujo de succión de baja presión para mezclarlo con otro flujo de poder de alta presión y expulsar un flujo de mezcla a una presión mayor que el flujo de succión, pero menor que la del flujo de poder[5].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Como para cualquier bomba, la eficiencia de un eductor se define como:

$$\eta_{eductor} = \frac{\text{Energía ganada}}{\text{Energía suministrada}} \quad (12)$$

Expresando la energía en términos de presiones y caudales, se obtiene:

$$\eta_{eductor} = \frac{(pd - ps) Q2}{(pn - pd) Q1} \quad (13)$$

Donde:

pd = presión en el difusor (salida del eductor)

ps = presión de succión

pn = la presión en la boquilla

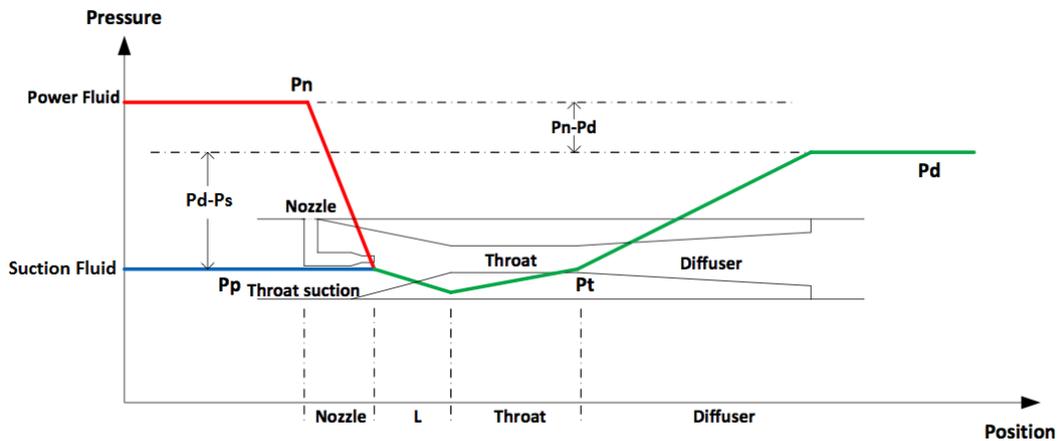
$Q1$ = caudal en la boquilla

$Q2$ = caudal de succión

Fuente: Tomado de [5].

En la Figura 30 se refleja el comportamiento descrito por [5] de los dos fluidos dentro de un eyector, cabe aclarar que para cada dispositivo el comportamiento de los fluidos en las diferentes secciones varía dependiendo de la alimentación del fluido inicial y de las dimensiones, sin embargo en este caso particular se puede evidenciar que el fluido de alimentación línea roja presenta una presión inicial superior y una vez llega el fluido a la sección de la garganta hay una unificación con el fluido secundario tanto en presión como en velocidad, el autor esclarece que al fluido pasar por la boquilla esta ejerce una restricción de flujo la cual causa una disminución de la presión a medida que la energía potencial se transfiere a la energía cinética y una vez superada la región de mezclado se eleva la presión nuevamente en el difusor línea verde pero no logra igualar la presión inicial del fluido motor.

Figura 30. Comportamiento de la presión en el eje axial de un eductor.



Fuente: Tomado de [5].

3.3 Contacto Adherencia entre las burbujas de gas y la partícula o gota de aceite en la columna de flotación.

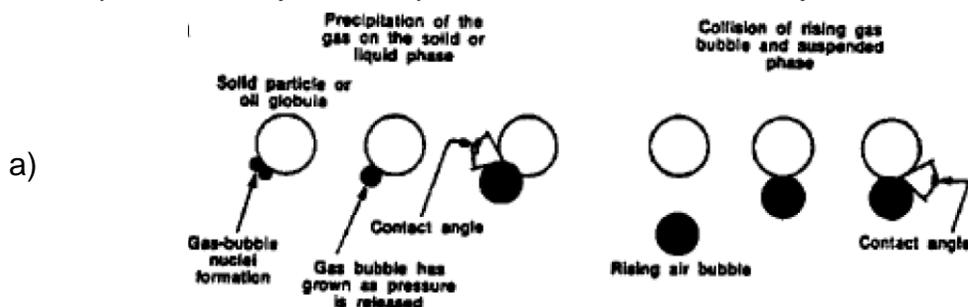
3.3.1 El proceso de adhesión

Esta acumulación de materia formada por las sustancias en suspensión, denominada flóculos, experimentan fuerzas de atracción debida a la cohesión¹ existente entre las partículas que los componen [49]. Debido a este fenómeno y a la presencia de micro burbujas, se da lugar a tres posibles mecanismos de interacción entre los flóculos y las burbujas para el contacto partícula-gas (ver Figura 31):

- El primer tipo de contacto es por la precipitación de la burbuja de gas en la partícula suspendida o por la colisión de la burbuja de gas con la partícula suspendida, donde el ángulo de contacto entre la burbuja y la partícula suspendida determina si la burbuja liga o une los restos de la partícula suspendida [50].
- El segundo mecanismo de unión se produce cuando los flóculos atrapan a las burbujas de gas creciente y se genera un efecto de captura o arrastre de flóculos por las micro burbujas [50]-[49].
- El tercero es por el atrapamiento de la burbuja de gas entre los flóculos, es decir, por aprisionamiento de las burbujas en los flóculos [50]-[49].

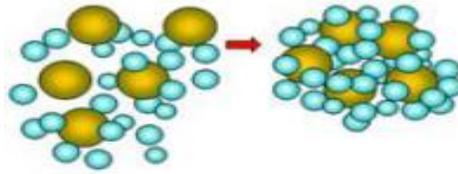
Figura 31 Tipos de contacto partícula-gas.

a). Precipitación de la burbuja en la partícula. b). Captura o arrastre de los flóculos por las burbujas. C. Aprisionamiento de las burbujas en los flóculos.

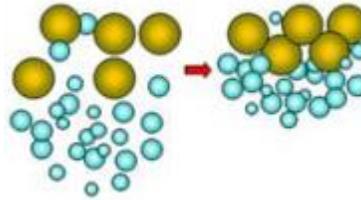


¹ **Cohesión:** Unión entre las moléculas de un cuerpo, debida a la fuerza de atracción molecular.

b)



c)



Fuente: Modificado de [49]-[51].

Teniendo presente el concepto de densidad de una sustancia, se sabe que esta está fuertemente relacionada con su flotabilidad, de modo que una sustancia flotara sobre otra si su densidad es menor. Por lo tanto, la unión entre flóculos y burbujas aumentara la flotabilidad debido a que el aire o gas tiene una densidad muy baja, es decir, tiene poca masa y ocupa mucho volumen, y al unirse a una partícula de petróleo, la masa de esta mezcla aumentara muy poco, mientras que su volumen aumentara considerablemente, haciendo que la densidad baje en demasía. Lo anterior, debe cumplir la condición de la ecuación (14), por lo que la densidad del petróleo y el aire o gas de la burbuja está definido por la ecuación (15). También es importante conocer que la densidad del petróleo se expresa comúnmente en grados API y para razones de cálculos se rige por la ecuación (16) [52].

$$\rho_a > \rho_p + \rho_g \quad (14)$$

Donde:

ρ_a = Densidad del agua.

ρ_p = Densidad del petróleo.

ρ_g = Densidad del aire o gas.

$$\frac{m_a}{V_a} > \frac{m_p + m_g}{V_p + V_g} \quad (15)$$

Donde:

$m_{a,p,g}$ = Masa del agua, petróleo y gas.

$V_{a,p,g}$ = Volumen del agua, petróleo y gas.

$$\rho_p = \frac{141.5}{131.5 + ^\circ API} \quad (16)$$

3.3.2 Velocidad Ascensional.

Retomando algunos conceptos del capítulo 1, es necesario tener en cuenta que la flotación de sólidos en suspensión o aceites, se produce cuando:

- Diferencia entre la masa volumétrica de los sólidos o flóculos y la del líquido en que se encuentran en suspensión, esto es, una masa volumétrica real (flotación natural) o aparente (flotación provocada) inferior a la del líquido que la contiene.
- En el caso de la flotación provocada, se aprovecha la capacidad que tienen ciertas partículas sólidas o líquidas para unirse a burbujas de gas (generalmente, aire) y formar conjuntos partícula-gas menos densos que el líquido que constituye la fase dispersa.
- La resultante de las fuerzas (gravedad, empuje de Arquímedes, fuerza de resistencia) conduce a un desplazamiento ascendente de los conjuntos partícula-gas que se concentran en la superficie libre del líquido.
- Para que sea factible la flotación de partículas sólidas o líquidas más densas que el líquido, es preciso que la adherencia de las partículas a las burbujas de gas sea mayor que la tendencia a establecer un contacto entre las partículas y el líquido.

El conjunto partícula-burbuja de gas adquiere rápidamente una velocidad ascensional cuyo valor permanece constante: Se trata de la velocidad límite de ascensión, que se calcula, al igual que las partículas sometidas a sedimentación, por medio de la fórmula general de Newton [53]:

$$V^{2-n} = \frac{4d^{1+n}g(\rho_s - \rho)}{3C_e} \quad (17)$$

Tal que:

- V = Velocidad ascensional.
 d = Diámetro del conjunto partícula-burbuja de gas.
 ρ_s = Masa volumétrica del conjunto partícula-burbuja de gas.

3.3.3 Trayectorias de una Burbuja.

Antoine Wilhelmus [54], se interesa en burbujas que suben en un fluido con bajo número de Morton, a un número de Reynolds del orden de 200-900, un buen

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

ejemplo para un fluido con bajo número de Morton sería el agua, y en este caso, considerando un rango de Reynolds bajo, 200-600, la burbuja tiene una forma esférica y su trayectoria es rectilínea; mientras que al aumentar el Reynolds al rango superior entre 600-900, la forma comienza a tornarse como una elipsoide achatada y la trayectoria cambia entre zigzag y espiral, ambas irregulares[54].

Muchos autores establecen una relación entre la forma de la burbuja y el número de Weber; esto es, para bajos números de Weber la burbuja presenta una forma estable, y luego con el aumento de Weber, la forma de la burbuja se vuelve inestable. Para un movimiento estable, el máximo número de Weber es aproximadamente de $W_{e\ max} = 3.271$, con una razón de aspecto del eje de la burbuja $x = 3.722$. Miksis, encontró valores similares para esta aseveración, en su caso los valores corresponden a $W_{e\ max} = 3.23$ y $x = 3.85$. El máximo número de Weber para la forma inestable es muy cercano al “weber crítico” para trayectoria inestable $W_{e\ crit} = 3.17$. [43].

Se cree que la aparición de la trayectoria inestable ocurre con un Weber crítico, el cual depende de las propiedades del fluido Una relación útil es el aumento de “Reynolds crítico” con la disminución del número de Morton. Tsuge y Hibino determinaron las siguientes funciones empíricas (18) y (19) [43].:

$$W_{e\ crit} = 21.5Re^{-0.32} \tag{18}$$

$$R_{e\ crit} = 9.0Mo^{-0.173} \tag{19}$$

Hartunian y Sears, determinaron dos criterios separados para el comienzo de trayectoria inestable en varios líquidos[43], estableciendo una relación entre el radio equivalente y la trayectoria de la burbuja (Tabla 6).

$$R_{e\ crit} = 202$$

$$W_{e\ crit} = 202$$

Tabla 6. Relación de Saffman.

Trayectoria Recta	$r_{eq} < 0.7\ mm$
Solo trayectoria Zigzag	$r_{eq} = 1\ mm$
Trayectoria Zigzag o espiral Saffman	$r_{eq} > 1\ mm$

Fuente: Tomada de [21].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

A continuación Tabla 7, se muestra un resumen de los criterios dispuestos por diferentes autores con respecto a la trayectoria de la burbuja. [43].

Tabla 7. Criterios para trayectorias de burbujas.

Autor	Recta	Espiral	Zigzag
Haberman y Morton (1954)	Re < 300	300 < Re < 300	Re > 300
Hartunian y Sears (1957)	Re < 202 We < 3.17	Re > 202 We > 3.17	Re > 202 We > 3.17
Saffman (1956)	$r_{eq} < 0.7$ mm Re < 400	$r_{eq} > 1.0$ mm --	$r_{eq} > 0.7$ mm Re > 400
Aybers y Tapucu (1969)	$r_{eq} < 0.67$ mm Re < 565	$0.67 < r_{eq} < 1.0$ mm 565 < Re < 880	$r_{eq} = 1.0$ mm 880 < Re < 1350
Dilneveld (1994, 1995)	$r_{eq} < 0.91$ mm We < 3.3 Re < 662	-- -- --	$r_{eq} > 0.91$ mm We > 3.3 Re > 662

Fuente: Tomada de [21].

3.3.4 El Proceso de Coalescencia de una Gota de Petróleo y la Burbuja.

El proceso de flotación está basado principalmente en el mecanismo de adhesión que se presenta entre las partículas o sustancias contaminantes hidrofóbicas y burbujas de aire o gas de tamaños del orden de los 15 a 2000 μm de diámetro dependiendo del tipo o tamaño del contaminante en suspensión con el agua [10]. La adhesión es la propiedad de la materia que describe la interacción entre las superficies de distintos cuerpos, por la cual dos superficies de sustancias iguales o diferentes se unen cuando entran en contacto, y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares.

La coalescencia de dos burbujas ocurre en tres pasos; Primero, las burbujas chocan atrapando una ligera cantidad de líquido entre ellas. En segundo lugar, esta película líquida se drena hasta que alcanza un grosor crítico. Al final, la película se rompe y las burbujas se unen [2].

El proceso de coalescencia depende de la velocidad de colisión de las dos burbujas y de la eficacia de la colisión. La coalescencia es una función de tiempo requerido para la coalescencia y tiempo de contacto. La colisión es una consecuencia de la

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

turbulencia, el cizallamiento laminar y la flotabilidad. La colisión también se desarrolla debido a la diferencia en las velocidades de ascenso de las burbujas con diferentes tamaños.

3.3.5 Tensión Superficial

A consecuencia de esta atracción intermolecular, la superficie de separación de dos fluidos no miscibles conocida como interfaz, tiende a adoptar el área mínima compatible con el volumen de fluido encerrado y con las fuerzas exteriores que actúan sobre los fluidos [55]. Además, para un sistema liquido/gas, la energía de la interfaz por unidad área (tensión interfacial) se denomina tensión superficial y suele tratarse como una propiedad del líquido en cuestión, en la que las moléculas de la superficie del líquido, experimentan fuerzas hacia los lados y hacia abajo, de manera que son atraídas hacia el interior de este; provocando que esta película de moléculas superficiales se comporte de forma similar a una membrana elástica. Por lo tanto, la tensión superficial es la que explica la formación de las burbujas y también cierra una gota y la sostiene contra la gravedad cuando cuelga de una superficie [52].

3.3.6 Humectabilidad

En las aguas de producción permanecen suspendidas partículas correspondientes a sólidos, petróleo y otros contaminantes, que se adhieren entre sí debido a la tendencia de alguno de estos fluidos contaminantes a adherirse o humedecer de manera preferente a la superficie de las partículas sólidas en presencia de otros fluidos inmiscibles, en este caso agua. Este fenómeno se conoce como humectabilidad y determina si la fuerza humectante es de atracción (positiva) o de repulsión (negativa); es decir, si un fluido moja o no una superficie sólida. La humectabilidad se determina mediante el balance de fuerzas entre los dos fluidos inmiscibles en la línea de contacto entre los dos fluidos (agua y petróleo) y el sólido, representando la ecuación (20), de Young (ver Figura 32) [52].

$$\sigma_{OS} - \sigma_{WS} = \sigma_{OW} \cos \theta \quad (20)$$

Donde:

σ_{OS} = Energía interfacial entre el petróleo y el sólido, [dinas/cm].

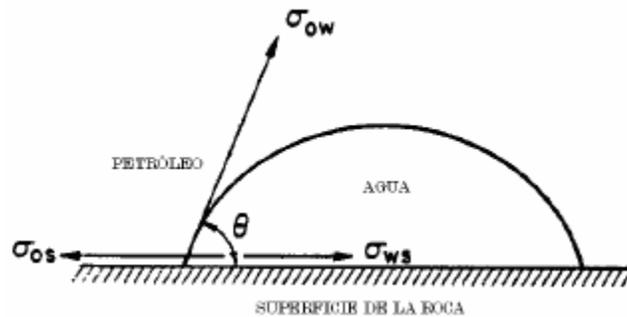
σ_{WS} = Energía interfacial entre el agua y el sólido, [dinas/cm].

σ_{OW} = Energía interfacial (tensión interracial) entre el aceite y el agua, [dinas/cm].

$\cos \theta$ = Angulo de la interface aceite-agua-sólido medido a través del agua, grados.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

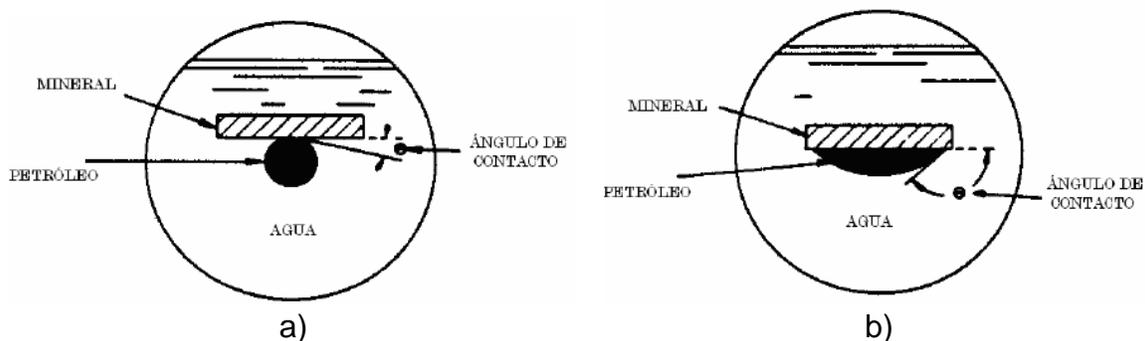
Figura 32. Sistema de humectabilidad petróleo/agua/sólido.



Fuente: Tomado de [52].

La ecuación demuestra que el ángulo de contacto θ es la principal medida para determinar la humectabilidad para una superficie lisa homogénea. Por lo tanto, para el sistema presente en las aguas de tratamiento industrial (agua/petróleo/sólido), si el ángulo θ tiene valores cercanos a cero, el sistema se considera humectado por agua; sin embargo, si θ es cercano a 180° [52], el sistema es humectado por el petróleo como se muestra en la Figura 33.

Figura 33. Ángulos de contacto medidos a través de la fase agua.
a). Sistema humectado por agua. b). Sistema humectado por petróleo.



Fuente: Modificado de [52].

Debido a su larga cadena compleja polar, moléculas de hidrocarburos con sulfuros, nitrógeno y radicales de oxígeno, los compuestos del petróleo forman una placa en capas delgadas sobre las superficies de las partículas, preferiblemente las sólidas provenientes de las rocas. Por esta razón, se puede inferir que las partículas sólidas suspendidas en el agua están fuertemente humectadas por las partículas de petróleo y también podrán ser removidas del agua por medio de flotación con micro burbujas.

3.3.7 Velocidad Terminal de una Burbuja

Al considerar una burbuja aislada, se consideran tres regímenes para los cuales variará la velocidad y forma de la burbuja a medida que aumenta el diámetro equivalente [56]:

- Viscosidad dominante.
- Región intermedia donde la viscosidad, tensión superficial y efectos inerciales deben ser tomados en cuenta.
- Inercia dominante: La región media presenta mayores dificultades ya que la interacción de fuerzas y sus efectos en la velocidad terminal no están muy bien entendidos. Más aun la velocidad terminal es particularmente sensitiva a la presencia de contaminantes e incluso a la deformación inicial inducida por la inyección[56].

En burbujas de aire ascendiendo en agua pura, el régimen intermedio abarca un rango de diámetro equivalente entre 0.07 y 0.65 cm. Esto corresponde a partículas de número de Reynolds (Re) entre 80 y 1500, para condiciones de presión y temperatura normales.

En [56] se presenta la existencia de tres aproximaciones básicas para la velocidad terminal:

- **Balance de fuerza:** La velocidad terminal, resulta del análisis de un balance de fuerza entre el arrastre y el empuje, la solución más representativa son obtenidas de una progresiva fuerza de arrastre y flujo potencial². Esta ecuación puede ser adecuada para predecir la velocidad terminal de pequeñas burbujas cuando los efectos viscosos, son todavía dominantes.
- **Análisis dimensional:** Grupos adimensionales son determinados a partir de variables que gobiernan el movimiento de burbujas, se propone una relación funcional para estos grupos y los parámetros se ajustan a partir de datos experimentales.
- **Analogía de onda:** Perturbaciones en la interface son asumidas para burbujas cuya dinámica es similar a la propagación de ondas en un fluido ideal; entonces la velocidad terminal es estimada como una función del diámetro equivalente y las propiedades del fluido [14]-[24].

Considerando la región intermedia, los efectos inerciales se combinan con la viscosidad y los efectos de la tensión superficial. Esto indica que una ecuación de la velocidad terminal, válida cuando los efectos viscosos aún son importantes,

² La teoría de flujo potencial pretende describir el comportamiento cinemático de los fluidos basándose en el concepto matemático de función potencial, asegurando que el campo de velocidades (que es un campo vectorial) del flujo de un fluido es igual al gradiente de una función potencial que determina el movimiento de dicho fluido

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

puede ser combinada con otra ecuación que sea válida cuando los efectos de tensión superficial son reveladores.

De acuerdo a [56], inicialmente, es sensato proponer una ecuación desarrollada a partir de la perspectiva del equilibrio de fuerzas. Luego sería razonable utilizar un enfoque de analogía de ondas. Procediendo de esta manera, se puede obtener una ecuación, que sea válida para una amplia gama de diámetros equivalentes de burbuja.

Cuando los efectos viscosos son relevantes y el diámetro de la burbuja es pequeño, la ecuación (21) asegura que la contribución de V_{T_2} sea despreciada; lo opuesto ocurre con V_{T_1} a un diámetro de burbuja grande[52].

$$V_T = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{V_{T_1}^2} + \frac{1}{V_{T_2}^2}}} \quad (21)$$

Donde:

V_{T_1} = Velocidad de subida cuando los efectos viscosos aún son dominantes (23).

V_{T_2} = Velocidad cuando los efectos de la tensión superficial son significantes (24).

Cuando los efectos de viscosidad están perdiendo su influencia, la velocidad terminal para una burbuja en flujo potencial puede ser determinada por la ecuación (22) [24].

$$V_{T\ pot} = \frac{1}{36} \frac{(\Delta\rho * g * d_e^2)}{\mu_L} \quad (22)$$

Donde:

$\Delta\rho$ = Diferencia de densidad entre el líquido y el gas.

d_e = Diámetro de una burbuja esférica de volumen equivalente.

μ_L = Viscosidad dinámica del líquido.

g = Aceleración de la gravedad.

Para el cálculo de V_{T_1} y V_{T_2} se puede hacer uso de las ecuaciones (23) y (24).

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

$$V_{T_1} = V_{T_{pot}} \left[1 + \frac{0.73667(g * d_e)^{\frac{1}{2}}}{V_{T_{pot}}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

$$V_{T_2} = \left(\frac{3\sigma}{\rho_L * d_e} + \frac{g * d_e * \Delta\rho}{2\rho_L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

CAPITULO 4

PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE LAS BOQUILLAS EN EL SISTEMA ECOFLOT.

Para llevar a cabo la propuesta de mejora en la implementación de boquillas del sistema realizado por ECOPETROL S.A, fue necesario desarrollar el estudio de tratamientos de aguas residuales, la patente ECOFLOT y el funcionamiento del dispositivo generador de microburbujas, como también la columna de flotación, en esta última no se profundizará, sin embargo se plantean algunos principios como complemento para vislumbrar el funcionamiento y objetivo del sistema ecoflot.

Con la investigación desarrollada, se lograron identificar las características principales de los diferentes sistemas y componentes relacionados con el caso de estudio; identificando que se trata de un flujo multifásico, el cual puede ser considerado como una mezcla heterogénea de varios fluidos o fases no mezcladas homogéneamente, reconocibles como estructuras microscópicas, como partículas sólidas, gotas o burbujas, en una cierta región del dispositivo Venturi.

Estas fases pueden ser clasificadas de acuerdo a su estado gas/líquido, gas/sólido, líquido/líquido y líquido/sólido. De los cuatro tipos de flujo bifásico, es gas/líquido, el que será tratado en este trabajo. Este tipo de flujos resultan los más complejos ya que combinan las características de una interface móvil y deformable con la compresibilidad de la fase gaseosa [41].

Con lo la literatura consultada se establecieron las siguientes fases de trabajo: estudiar la boquillas utilizadas actualmente por Ecoflot, hacer una investigación literaria referente a los eyectores patentados y comercializados, hacer una comparación estructural y de desempeño entre estos dos ítems, una vez alcanzados estos puntos proponer una reconfiguración geométrica que asegure teóricamente un mejor desempeño.

4.1 Estudio de la boquilla (Mazzei) usada en la patente ecoflot como generador y distribuidor de microburbujas.

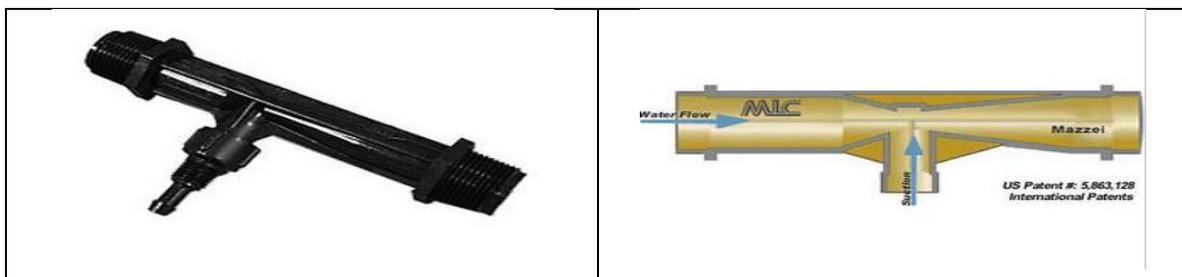
Con el estudio realizado acerca de la patente ECOFLOT, se puede concluir que las especificaciones más importantes para las boquillas utilizadas son las siguientes:

- **Boquilla implementada:** Inyectores tipo Venturi (Tabla 8).

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

- **Principio:** Diferencia de presiones o efecto Venturi, el cual consiste en la disminución de la presión y el aumento de la velocidad que experimenta un fluido al pasar por una zona de menor sección dentro de un ducto cerrado, creando un vacío, el cual succiona una segunda corriente (gas); esta segunda corriente es mezclada con la corriente de agua recirculada, generando burbujas finamente distribuidas.
- **Eficiencia:** 90% para retiro de grasas/aceites y un 70% para cantidad de sólidos suspendidos.
- **Datos técnicos:** Marca Mazzei, modelo 484x de 3/4" de diámetro, delta de presión de 5 psig y caudal requerido de 1,6 ft³/h, succión de 1.2 ft³/h. Cada una, con un aporte de aire o gas de inyección de 1,21844 (ft³/hr).
- **Diámetro de burbuja** = 200 a 300 μm .
- **Burbujas por cm³ de líquido saturado** = 0.5 a $1 \cdot 10^4$.
- **Presión en el distribuidor de líquido a saturar con gas** = 101,3 KPa y 1013 KPa.

Tabla 8. Boquilla utilizada por ECOFLOT.



Fuente: Tomado de [57].

La ficha técnica de la boquilla presenta información acerca del caudal del inyector y su capacidad de aspiración (Tabla 9).

Tabla 9. Ficha técnica de la boquilla Mazzei.

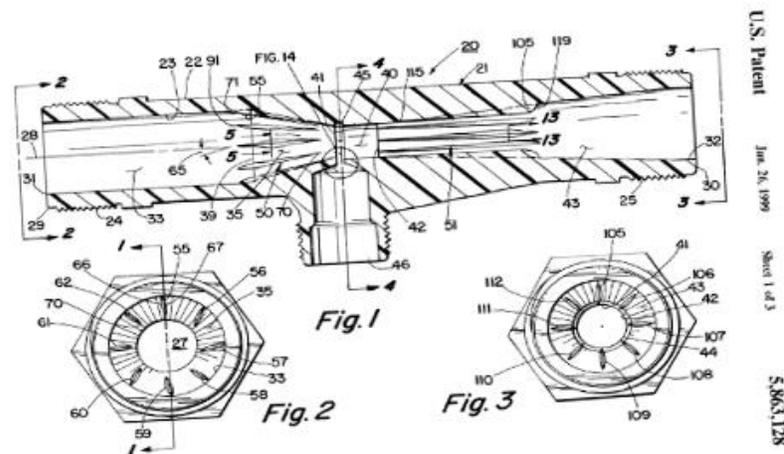
Presión		AIC 287 1/2"		AIC 484-X 3/4"		AIC 484 3/4"		AIC 584 3/4"		AIC 1078 1"		AIC 1583 1 1/2"		AIC 2081 2"	
Entrada bar	Salida bar	Caudal Inyector l/min	Capacid. Aspirac. l/min												
0,35	0	1,10	0,33	4,50	1,48	0,92	1,84	7,91	1,84	20,74	6,40	40,60	8,57	122,60	39,70
	0,07		0,16		1,05	0,66	1,82		2,93		5,33		39,70		
	0,14		0,11		0,75	0,42	1,80		1,40		3,36		39,70		
	0,21		0,08		0,46	0,06	1,60		0,17		-		13,50		
0,28	-	-	-	0,63	-	-	8,60	-	-	-	-	-	-	-	
0,70	0	1,21	0,39	6,40	1,88	1,18	1,78	11,20	1,78	29,30	6,67	57,40	13,87	173,40	39,70
	0,14		0,30		1,46	0,88	1,78		4,78		9,07		39,70		
	0,35		0,12		0,75	0,38	1,73		2,64		4,97		29,50		
	0,49		0,05		0,24	0,18	0,84		1,21		2,65		9,40		
0,56	-	-	-	0,69	0,28	-	1,90	-	-	-	-	-	-	-	
1,05	0	1,59	0,43	7,83	2,44	1,18	1,78	13,70	1,78	35,88	6,39	70,30	14,21	212,30	39,80
	0,35		0,26		1,32	0,72	1,76		5,04		10,33		39,30		
	0,49		0,18		0,99	0,52	1,77		4,08		7,85		36,40		
	0,70		0,08		-	0,06	0,88		2,16		5,46		13,40		
0,84	-	-	-	0,70	1,07	0,92	4,80	-	-	-	-	-	-	-	

Fuente: tomado de [44].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Una vez familiarizados con la hoja técnica de la boquilla Mazzei se recurre a la patente de la misma, para comprender su diseño estructural y comportamiento de los fenómenos físicos de los fluidos al ser sometidos a desplazarse por las secciones variables del inyector

Figura 34. Diseño estructural de la boquilla Mazzei.



Fuente: Tomado de [58].

Comparando visualmente las boquillas citadas en el anexo A, se puede encontrar una enorme diferencia de diseño, en primera estancia la cámara de intercambio es bastante restringida, sin embargo se cuenta con el espacio necesario para la conexión de la alimentación del segundo fluido, seguidamente se evidencia que el diámetro de la boquilla (D_n) ha sido suplido por la misma estructura divergente que conecta a la entrada de alimentación del fluido motriz, por lo que no se puede hacer variaciones de la longitud entre la boquilla y el tubo de mezcla.

Una vez superada la zona de intercambio este dispositivo se conecta directamente con la zona de mezcla que a su vez se fusiona con la región de difusión, para ser conectado a su última sección de salida que entrega el enriquecimiento y las burbujas a la columna de flotación si es el caso.

Un fenómeno particular es la adecuación de una especie de paletas situadas axialmente a lo largo de la región de estrechamiento y de expansión, estas paletas vienen en grupos de 8 y son las encargadas de dar torsión al líquido en la región de estrechamiento, mientras que en la región de expansión cumplen con la función de redireccionar el fluido y cortar por efecto cizallamiento las microburbujas para disminuir su tamaño y aumentar su cantidad poblacional.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

En la Tabla 10 se presentan las dimensiones de cada una de las secciones que conforman el dispositivo eyector de microburbujas de la empresa Mazzei. Estas dimensiones son las suministradas por la patente, hay una gran variación entre los datos geométricos suministrados por la hoja técnica y los de la patente, pues la patente hace referencia a unos diámetros de las secciones de conexión distintos a los de la hoja técnica.

Tabla 10. Dimensiones del dispositivo eyector de microburbujas de la empresa Mazzei.

Elemento	Ítem numérico	Valor (mm)
Diámetro sección de entrada	31	39.37
Diámetro sección de salida	32	39.37
Longitud axial sección de entrada	33	
Diámetro sección de entrada	28	39.37
Longitud axial sección de salida	43	143.7
Diámetro sección de entrada	43	39.37
Longitud axial de las aletas de torsión	50-62	24.13
Grado de las aletas de torsión	50-35	20 o 5-40 grados
Longitud axial del estrechamiento	35	27.6098
Diámetro de la unión	41	19.05
Ancho axial de la ranura	45	3.556
Longitud axial de la sección de inyección	40	16.637
Diámetro de la sección de inyección	40	20.066
Longitud axial de las aletas de enderezamiento	51	77.47
Grado de las aletas de enderezamiento	105-112	15 o 2-30 grados

Fuente: Modificado de [58].

En cuanto a la cantidad de energía disipada, transferencia de masa, intercambio volumétrico, y comportamiento de las secciones de entrada no se encontró información de la boquilla en cuestión.

4.2 Propuesta de Reconfiguración geométrica de un eductor para lograr una alternativa de mejora en la producción de microburbujas basado en la literatura.

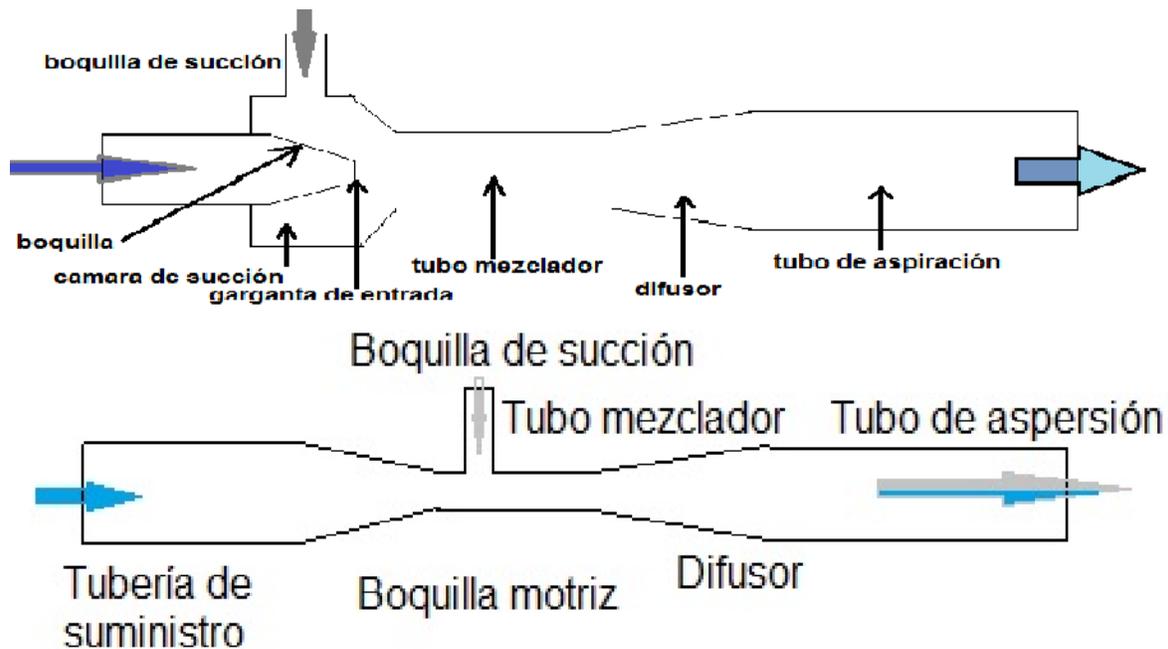
Para realizar esta propuesta se estudió extensamente el estado del arte de sistemas que usan eductores para la generación de burbujas. El Anexo A contiene un análisis de algunas de las literaturas consultadas que se ha decidido sacar del cuerpo de la monografía por razones de espacio.

Proponer un diseño de un dispositivo tan complejo como ha manifestado la literatura, el cual está influenciado por dos principios cruciales, primeramente el factor geométrico y seguidamente el fluido dinámico bifásico [41], ambos totalmente interactuantes, es un proceso que exige ser respaldado por pruebas de laboratorio, modelos matemáticos y parámetros exactos de los fluidos y sus propiedades a tratar. Sin embargo una vez consultada la literatura deja un panorama más claro de las secciones en las que se debe hacer énfasis: diámetro de la boquilla, distancia entre la boquilla a la sección de mezcla y tubo o garganta de mezcla. Teniendo en cuenta estos indicadores aumenta la probabilidad de obtener un mejor rendimiento tanto en el transporte de masa, consumo energético, evaluación volumétrica y calidad de las microburbujas.

En este caso la investigación hará énfasis en los modelos de los eyectores con mayor cámara de succión, pues según las fuentes estudiadas, son los de mayor aplicación para la generación de microburbujas debido a que la cantidad de aspiración del segundo fluido se ve reflejado en la mezcla apropiada y de allí el proliferamiento de partículas en la sección de difusión, por ende es a los que más se les ha dedicado estudio y pruebas de funcionamiento, comparados con los eyectores tradicionales utilizados por Ecoflot. La Figura 35 muestra los dos eductores considerados como propuesta de mejoramiento. Sin embargo es recomendable que en investigaciones futuras se pueda plantear un proyecto de comparación para estudiar cuál de los dos diseños arroja mayor eficiencia en un banco de pruebas.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Figura 35. Los dos diseños de eductores implementados para la generación de microburbujas y otras aplicaciones.



Fuente: Propia.

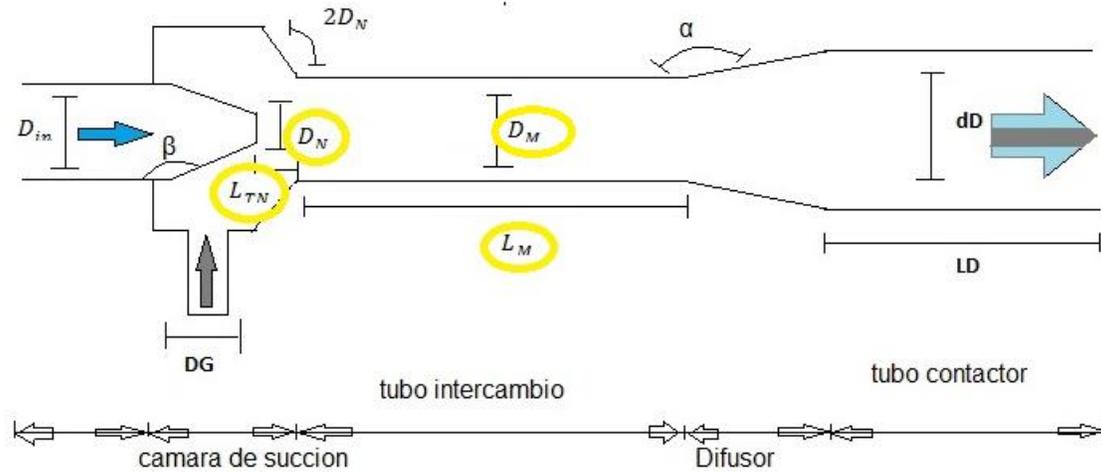
Una vez seleccionado el modelo estructural que se escogió, basado en la literatura se propondrá el dimensionamiento de las secciones cruciales, que incurrirán en una variación positiva o negativa del desempeño del dispositivo propuesto. En la Tabla 11 se consignan las dimensiones de cada una de las secciones y el elemento puntual con su respectivo valor en mm. La Figura 36 señala la nomenclatura referente a cada elemento y sección.

Respecto a los diámetros de alimentación se conservará los de la boquilla Mazzei, puesto que la patente Ecoflot ya tiene unas instalaciones en campo y su tendido hidráulico esta dimensionado a $\frac{3}{4}$ de pulgada para la alimentación del sistema generador de microburbujas.

Las dimensiones geométricas están basadas en el trabajo de [3], en donde se proponen una serie de ecuaciones (25), (26), (27), (28). Para dimensionar la boquilla de entrada, el espaciado de esta a la sección de mezclado, también se tuvo en cuenta el aporte de [1],[4] para dimensionar el diámetro y la longitud del tubo mezclador; como muchos aportes relacionados para hacer una idea generalizada de las secciones más trascendentales.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Figura 36. Nomenclatura seleccionada de los elementos que se variaran en el rediseño.



Fuente: Propia.

Tabla 11. Dimensionamiento del educor propuesto

Sección	Elemento	nomenclatura	Valor
Boquilla	Diámetro de la boquilla	D_N	1.6 mm
	longitud de boquilla	LN	60mm
	longitud divergente de boquilla	LdN	30 mm
	Radio de fluido motriz	D_{in}	19,05 mm
	Relación de área	$AR=AM/AN$ $AR=DM^2/DN^2$	149.5 mm ²
	Distancia entre la tobera y el comienzo de la garganta	$L_{TN} = (0.5 \mp 1) D_N$	2.4mm
	ángulo de paso/inclinación	$2D_N$	3.2mm
Cámara de succión	Radio de entrada de gas	D_{in}	19.05mm
	Ángulo de convergencia	θ_{con}	10 grados
	Radio de la cámara de succión	DS	77 mm
	Área de la cámara de succión	$\frac{(D_S)^2 - (D_N)^2}{(D_N)^2}$	2315 mm ²
	Longitud de la cámara de succión	LS	122 mm

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Garganta (cámara de mezcla)	Diámetro de la garganta / tubo de mezcla	D_M	16mm
	Longitud de la garganta / tubo de mezcla	L_M	120mm
	Proporción de proyección	$PR = L_{TN}/D_M$	0.3
Divergente (difusor)	Ángulo de divergencia del difusor cónico	θ_{div}	7 grados
	Diámetro de la salida del difusor	DC	25 mm
	Longitud del difusor cónico	Ld	200 mm
Tubo de aspersion	Diámetro del contacto o aspersion	DC	25 mm
	Longitud del contactor extendido o aspersion	LC	100 mm
	Int agua	V	1.6 m3/h
	Delta P0		0.2 Mpa
		U1	0.95
	Int gas/aire	QL	Succión

Fuente: Propia.

CAPITULO 5

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN MEDIANTE SOFTWARE CFD

Recientemente, con el rápido desarrollo de métodos de solución numérica, algunos investigadores han intentado aplicar la dinámica de fluidos computacional (CFD) en el modelado del flujo dentro de los eyectores para predecir su funcionamiento y rendimiento [38],[59],[37].

Aunque hay un número de documentos que han investigado el eyector numéricamente utilizando CFD, la mayoría de ellos utiliza un modelado bidimensional. En ese caso, el análisis de CFD no puede explicar el efecto de fenómenos de dinámica de fluidos que ocurren en las secciones del Venturi donde se producen fenómenos de intercambio volumétrico [1].

Para dar cumplimiento al objetivo de construir un modelo CAD/CAE para la alternativa de diseño de boquillas propuesta, se plantea la selección de una herramienta computacional que permita modelar la estructura, de tal manera que se refleje el diseño físico de los dispositivos a estudiar, en este caso la sección interna del eyector con sus respectivo arreglo de secciones tubulares o boquillas.

Para tal necesidad, se escoge el software comercial ANSYS (versión 14.0), programa de elementos finitos que originalmente ofrece soluciones para resolver análisis estáticos lineales, aunque, sucesivamente se han ido desarrollando módulos con los que este programa es capaz de resolver además problemas dinámicos, estructurales, electrónicos, fluido-dinámicos, sistemas embebidos y en sus últimas versiones, paquetes para desarrollos HMI (“Human Machine Interface”) [60].

Además, se hará uso de la herramienta Solver Fluent de ANSYS, para simular (Computational Fluid Dynamics - CFD) el movimiento de los fluidos aire/gua en cada una de las boquillas mencionadas. Este software CFD resuelve numéricamente las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes de Reynolds mediante el método de volumen finito en una geometría de malla [27]. Es importante resaltar que una característica destacada de la herramienta ANSYS es: “al crear la geometría que va a representar el fluido o material a simular, es decir, si se pretende simular el flujo a través de un perfil aerodinámico, la geometría no debe representar el perfil en sí, sino la porción de fluido a través del perfil”.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

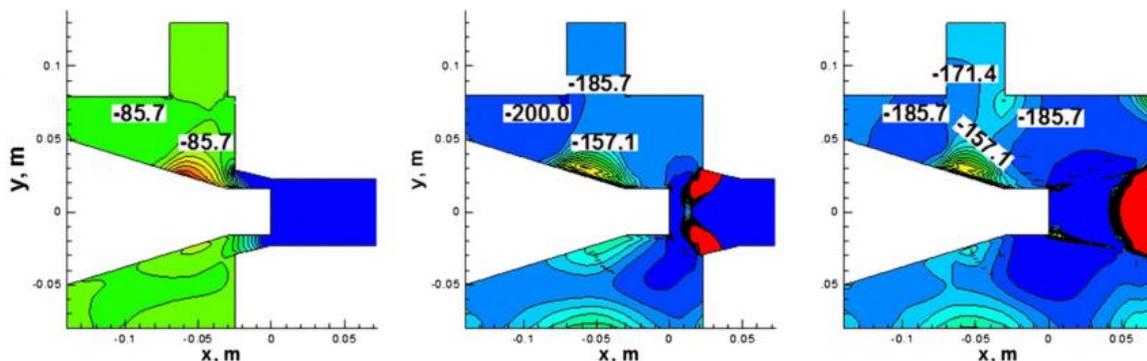
Para la creación de geometría se puede utilizar el modulo disponible en ANSYS "Design Modeler" u otros software CAD como SolidWorks, CATIA, AutoCAD, Inventor, SolidEdge etc.

Los eyectores estudiados y propuestos son modelados en geometría tridimensional con el fin de obtener una aproximación real, sin embargo como no se contó con un laboratorio de pruebas para validar los resultados y esta investigación queda como una aproximación. Además se esclarece que el fluido secundario en este proceso de simulación se toma el aire, por dos factores el primero es el desconocimiento de los componentes del gas blanket usado por ecoflot y el segundo para evitar carga computacional.

5.1 Diseño CAD y evaluación computacional de una de las boquillas seleccionadas basado en el estado del arte.

Seleccionar una boquilla es un trabajo complejo por el motivo que en la mayoría de patentes y proyectos de investigación no se encuentran los datos completos del dimensionamiento del sistema educor. Por esta atribución esta investigación toma dos referencias de trabajos previos; el aporte de Lijun Wang, Yan Jia [4] en el que se enfocan en demostrar el comportamiento del eyector mediante simulación CFD con variaciones en la boquilla y su relación con la cámara de mezclado, ver Figura 37. En el anexo A de este documento se muestra detalladamente el dimensionamiento de la cámara de succión y diámetros de la boquilla de este eyector.

Figura 37. Evaluación CFD del desarrollo propuesto por Lijun Wang, Yan Jia.

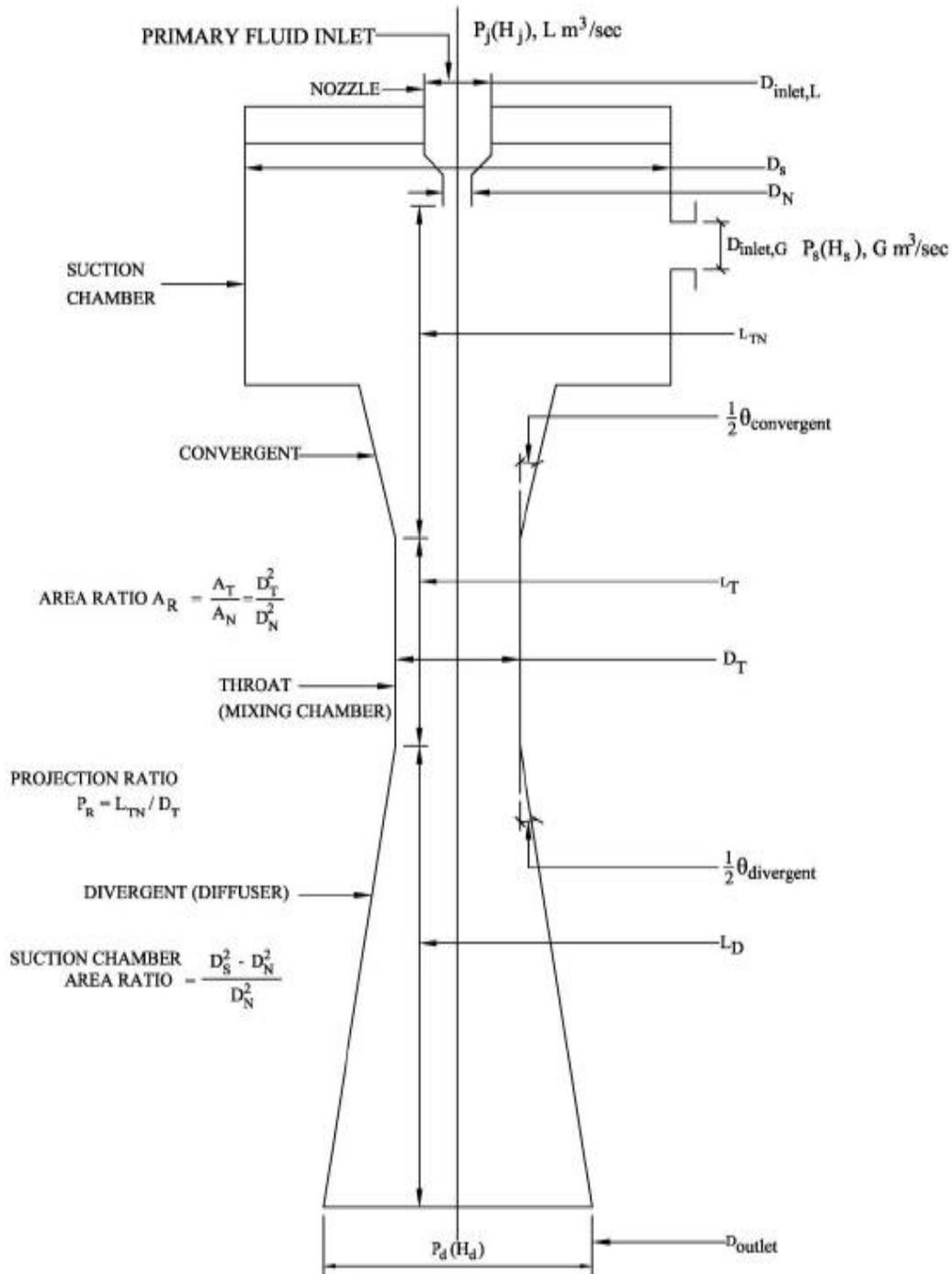


Fuente: Tomado de [4]

Sin embargo el trabajo de Dhanesh Patel, Ashvinkumar Chaudhari [2] brinda un esquema más completo Figura 38,y Tabla 12 describiendo cada sección del dispositivo. Esta investigación es una de las pocas que entrega el dimensionamiento estructural completo del dispositivo usado en sus investigaciones.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Figura 38. Esquema geométrico propuesto por Dhanesh Patel, Ashvinkumar Chaudhari.



Fuente: Tomado de [2].

Tabla 12. Dimensionamiento estructural de la propuesta de Dhanesh Patel, Ashvinkumar Chaudhari.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

		Setup – III		
Nozzle diameter	D_N	8.2 mm	4.7 mm	3.7 mm
Number of nozzle	n	1	3	5
Nozzle No.		5	6	7
pitch *		$2D_N$		
Area ratio (appx) **	A_R	9.3		
Diameter of Throat/ mixing tube	D_T	25mm		
Length of Throat/ mixing tube ***	L_T	150mm		
Projection ratio #	P_R	4.5		
Angle of convergent	θ_{con}	well rounded		
Angle of divergence of conical diffuser ##	θ_{div}	7°		
Length of the conical diffuser	L_d	425		
Diameter of the diffuser exit	D_c	77		
Diameter of extended contactor	D_C	(-)		
Length of extended contactor	L_C	(-)		
Diameter of the suction chamber	D_S	77mm		
Length of the suction chamber	L_S	122mm		
Distance between nozzle & commencement of throat	L_{TN}	112mm		
Diameter of secondary gas inlet	$D_{G,in}$	25mm		
Volume of free jet	V_C	$26.32 \times 10^{-6} m^3$		
Volume of throat	V_T	$73.6 \times 10^{-6} m^3$		
Volume of divergence	V_D	$1156.78 \times 10^{-6} m^3$		
Total ejector volume	V_j	$1256.7 \times 10^{-6} m^3$		

Fuente: Tomado de [2].

Teniendo como referencia estas dos propuestas tanto en estructura como en evaluación en la Figura 39 se muestra el esquema de la boquilla propuesta por los autores, una vez recreada en el software Ansys fluent 14.0, en la que se puede evidenciar el comportamiento de los fluidos en su interior mediante la escala de colores, evaluando con velocidad de entrada del fluido primario 1.6 m/s. cabe aclarar que este parámetro fue adoptado por el motivo de evitar la cavitación que es un problema cuando se fuerza mucho fluido a través del área de la garganta. La cavitación también puede contribuir al deterioro de las bombas, ya que las burbujas implosionan y las ondas de choque golpean la pared de la bomba de chorro[61]

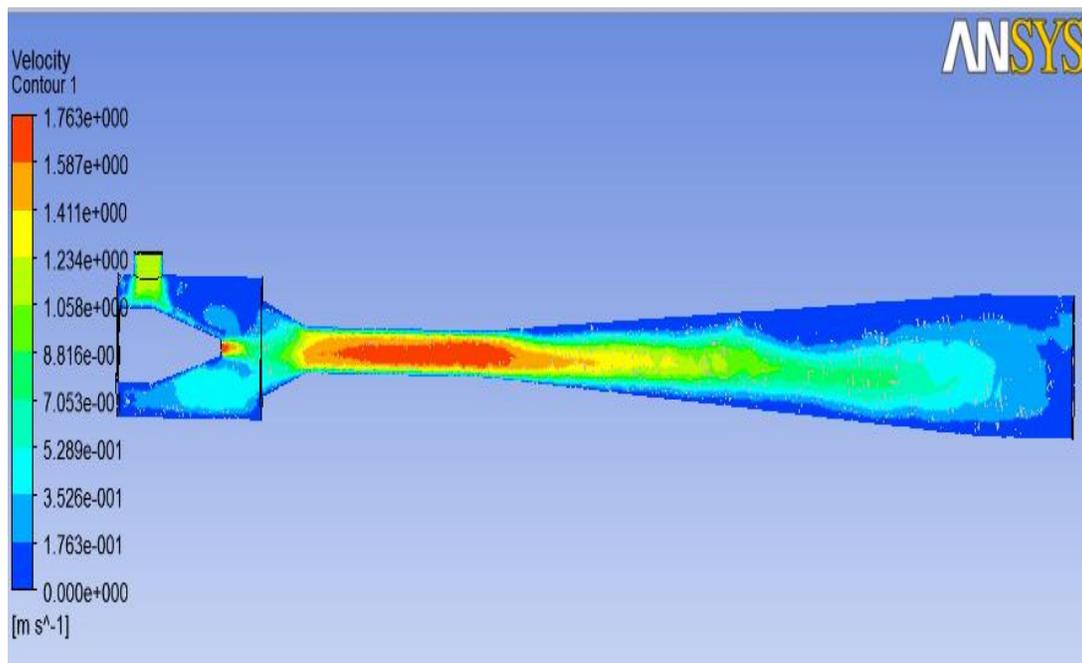
Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

además la longitud del chorro de fluido de potencia en la sección de mezclado también dependerá de la velocidad del fluido primario[5].

Los resultados de simulación de la Figura 39 muestran el perfil de velocidad del flujo en el eductor permitiendo observar que en la cámara de succión el líquido secundario presenta un desprendimiento hacia la cámara de intercambio, y que a pesar de que la salida de la boquilla esta retirada de la zona de mezclado, el chorro generado es lo suficientemente fuerte para llegar hasta ésta, y una vez el fluido pasa por la garganta de mezcla la escala de colores enseña que dentro de ella se está generando un incremento de velocidad alrededor de 19.172 m/s lo que indica que está superando la velocidad de entrada.

La Figura 40 muestra cómo al superar la entrada de alimentación se produce un desplazamiento o succión que ejerce sobre el segundo fluido, mostrando mediante líneas de flujo cómo este segundo líquido comienza a desplazarse dentro de la cámara de succión, y paulatinamente se va desplazando a la sección de intercambio en una forma laminar, para luego crear el enriquecimiento de los dos fluidos.

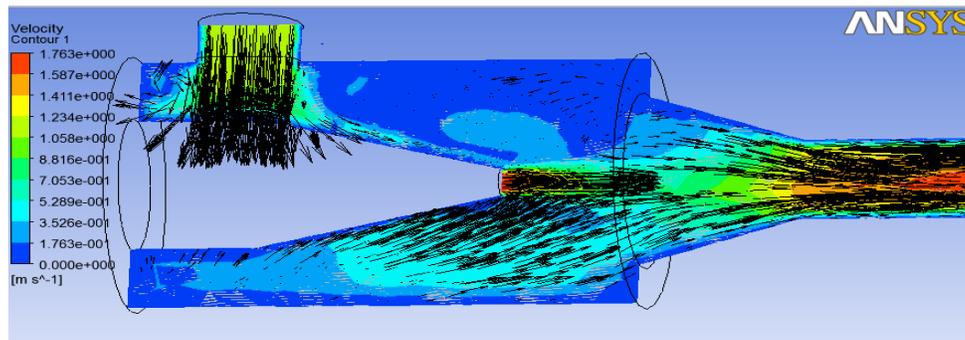
Figura 39. Boquilla seleccionada y recreada mediante Ansys, con velocidad de entrada 1.6 m/s.



Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

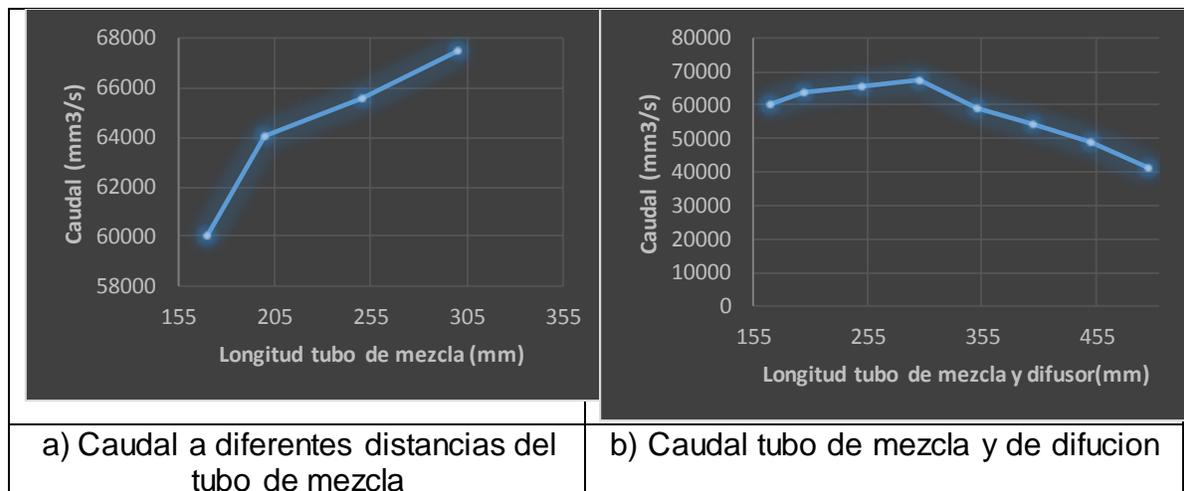
Figura 40. Líneas de flujo representativas del fenómeno de succión.



Fuente: Propia.

Este incremento representado en las líneas de flujos indica que existe ya no solo un fluido, si no que se ha sumado un fluido secundario, por ende la parte física del mezclador según Bernoulli incrementaría la velocidad y por lo tanto el caudal, a medida que varía la longitud de la sección de intercambio, este fenómeno se evidencia en la Figura 41 en donde a pesar de que el área trasversal del eductor se mantiene constante en esta zona, se presenta una aceleración que paulatinamente va descendiendo al llegar a la zona de difusión.

Figura 41. Comportamiento del caudal dentro de la cámara de intercambio y la sección de difusión



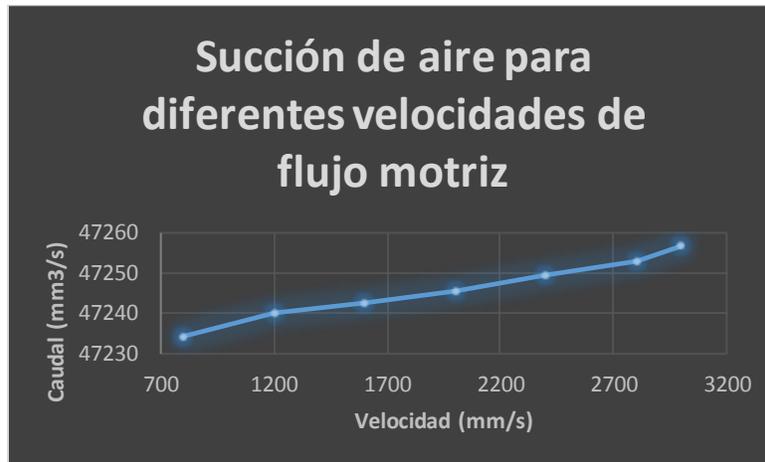
Fuente: Propia.

El comportamiento de los dos fluidos dentro del tubo de intercambio es proporcional a la capacidad de succión del dispositivo, entre mayor sea la capacidad de aspiración mejor será la calidad de mezcla entre las dos sustancias, por lo que se hace indispensable investigar cómo actúa el dispositivo eyector a variaciones del caudal de entrada del fluido motor, para tal fin se hacen variaciones de la velocidad de entrada de alimentación cercanas a la estipulada como trabajo de investigación

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

1.6 m/s, se tomaran muestras de 1.4 m/s a 2.8 m/s. en este rango de evaluación la Figura 42 muestra la capacidad de succión del dispositivo en cuestión.

Figura 42. Capacidad de succión del eductor suministrado por la literatura con variaciones de alimentación motriz.



Fuente: Propia.

El comportamiento de las microburbujas está influenciado también por el coeficiente de masa volumétrica y la tasa de disipación de energía ocurridas dentro de la sección de intercambio, junto a la cantidad del segundo fluido absorbido, dando como resultado el fenómeno de choque, sin embargo en la Figura 43 y Figura 44 para una relación de caudal $Q_G/Q_L=2.33$ se evidencia que a medida que el chorro se desplaza a lo largo de la sección axial de la región de mezcla estos dos fenómenos disminuyen debido a que ocurre un desprendimiento cuando una parte de la energía cinética del flujo se disipa en el choque creando la dispersión gas-líquido influenciado por el aumento del caudal de gas.

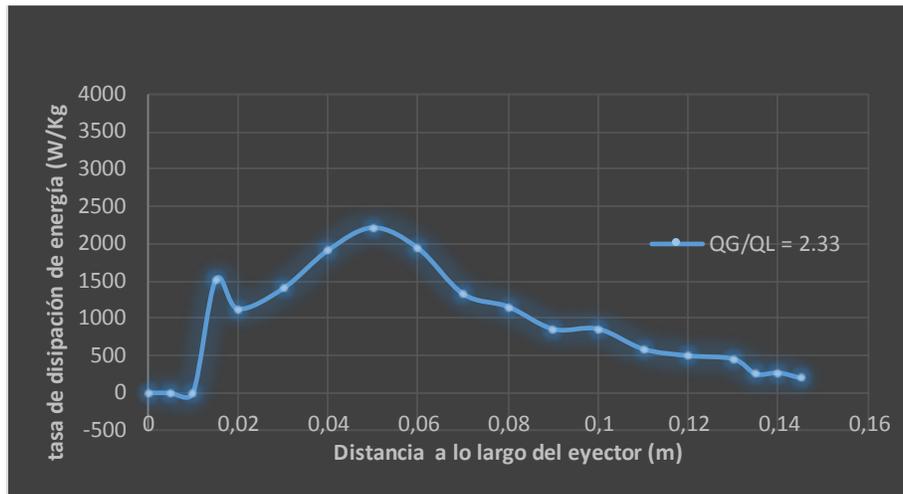
Figura 43. Coeficiente de transferencia de masa volumétrica $Q_G / Q_L=2.33$ eje axial del eductor.



Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

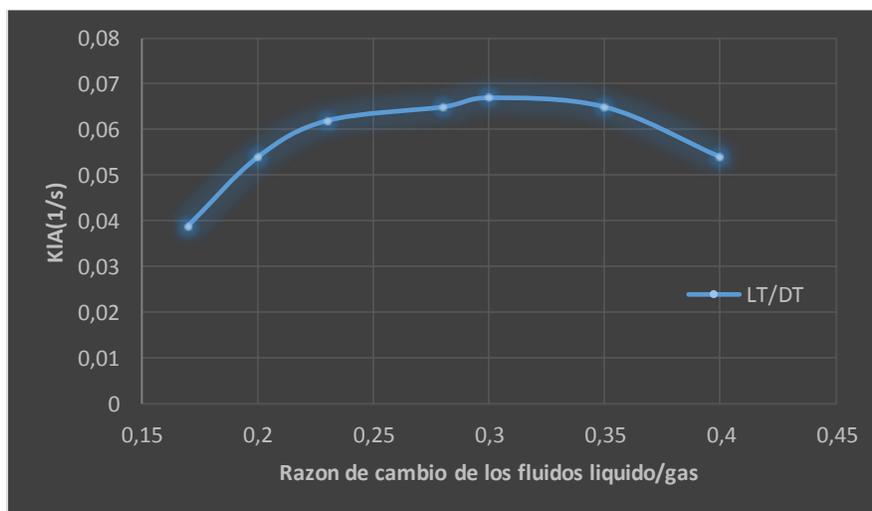
Figura 44. Distribución de la tasa de disipación de energía dentro del tubo eyector para $Q_G / Q_L = 2.33$.



Fuente: Propia.

Como el tubo de mezcla repercute en el fenómeno de dispersión y la transferencia de masa volumétrica, en la Figura 45 se muestra que efectivamente a medida que la relación entre la cantidad de aire/agua va aumentando a lo largo de la sección de mezclado, el coeficiente de transferencia de masa volumétrica aumenta y que una vez se acerca a la región de difusión esta particularidad disminuye mostrando la relevancia de un buen dimensionamiento de esta región.

Figura 45. Influencia de la longitud del tubo mezclador sobre el coeficiente de transferencia de masa volumétrica para $L_T/D_T = 12$.

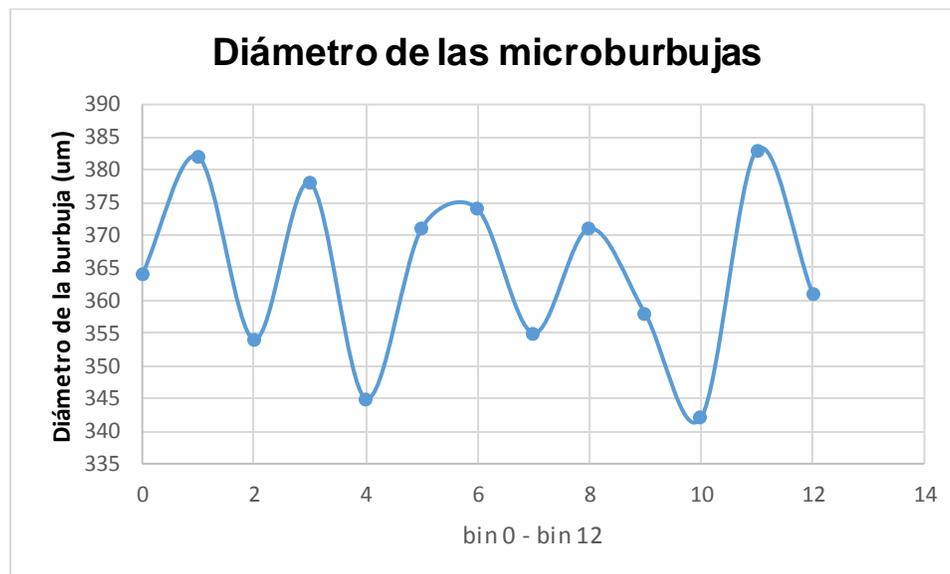


Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Una vez evaluados los fenómenos de intercambio de energía, capacidad de succión régimen volumétrico, y teniendo en cuenta la densidad de los fluidos, tensión superficial, el diámetro de las burbujas se estudia mediante la aplicación de un solver adicional de la aplicación FLUENT, este solver hace referencia al número de sauter, una aplicación probabilística que mediante el análisis de las cantidades volumétricas contenidas en una sustancia y parametrizando los diámetros posibles de las microburbujas puede describir cuáles son las tendencias de éstas dentro de un recipiente, también está en capacidad de evaluar el crecimiento poblacional, la mortandad y el nacimiento de nuevas microburbujas en fluidos combinados. Lo anterior es reconocido como Balance de Población (PBM) o modelo MUSIG (homogeneous Multi-size group approach) en ANSYS. La Figura 46 muestra la probabilidad de resultados que el software arroja una vez parametrizadas las alimentaciones del educor.

Figura 46. Tamaños de microburbujas.



Fuente: Propia.

Esta evaluación se llevó a cabo para una relación constante de boquilla a garganta de 8.73 mm que está por fuera de los rangos estipulados por [23], sin embargo los resultados se promedian en 364,46 μm , que son microburbujas ideales para la remoción de pequeñas partículas contenidas en aguas de producción.

Para ejecutar la evaluación en el modelo PBE se colocan los datos como se muestra en la Tabla 13 en los que se caracteriza la fracción volumétrica para los grupos ($i=0, 1, 2, 3, \dots, 13$), es posible aumentar el grupo a evaluar, sin embargo por recursos computacionales solo se evalúa para esta determinada cantidad de grupos, y el rango de microburbujas comprendido entre 14.47 μm a 970 μm .

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Tabla 13. Diámetro de microburbujas evaluadas en (PBE) para cada índice de clase.

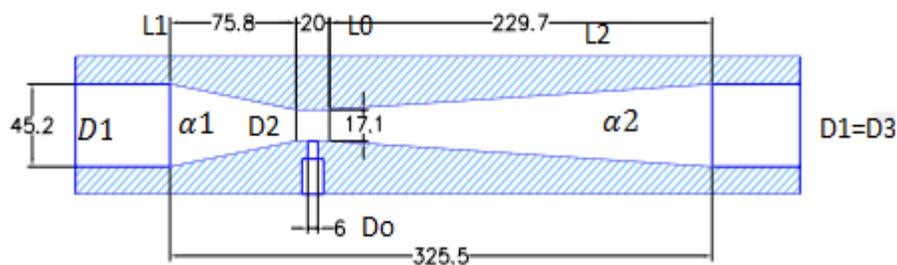
i	Fracción volumétrica	Tamaño de microburbuja (um)	Número Bin Índice de clase
0	0.005	670,05	Fracción bin 0
1	0.010	486,11	Fracción bin 1
2	0.015	337,64	Fracción bin 2
3	0.018	262,50	Fracción bin 3
4	0.020	18,35	Fracción bin 4
5	0.025	39,90	Fracción bin 5
6	0.030	80,25	Fracción bin 6
7	0.045	22,64	Fracción bin 7
8	0.055	74,74	Fracción bin 8
9	0.065	46	Fracción bin 9
10	0.070	21	Fracción bin 10
11	0.080	96,01	Fracción bin 11
12	0.085	77,81	Fracción bin 12
13	0.095	63,65	Fracción bin 13

Fuente: Propia.

5.2 Construcción CAD y evaluación computacional de la boquilla (Mazzei) utilizada por la patente ecoflot

El modelo CAD de la boquilla Mazzei 484 (implementada por ECOFLOT), corresponde a parámetros y dimensionamientos de un Venturi convencional, de las proporciones indicadas en la Figura 47.

Figura 47. Dimensiones boquilla Mazzei.

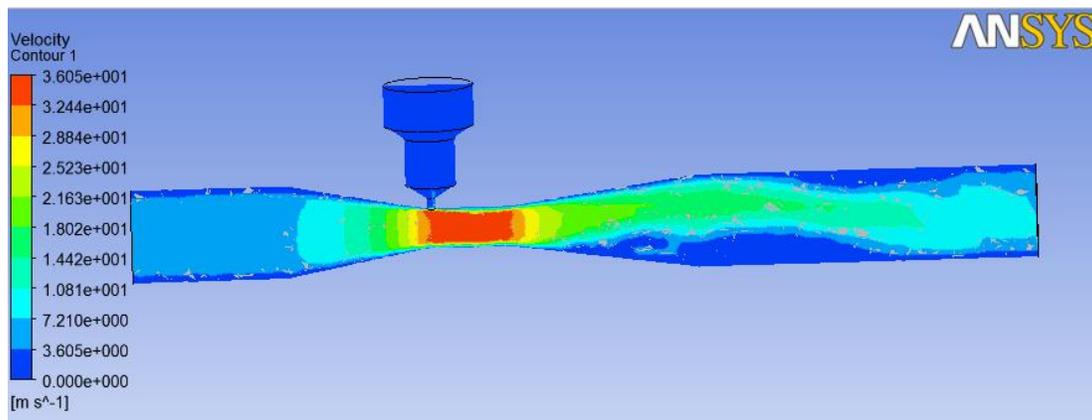


Fuente: Tomado de [22].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

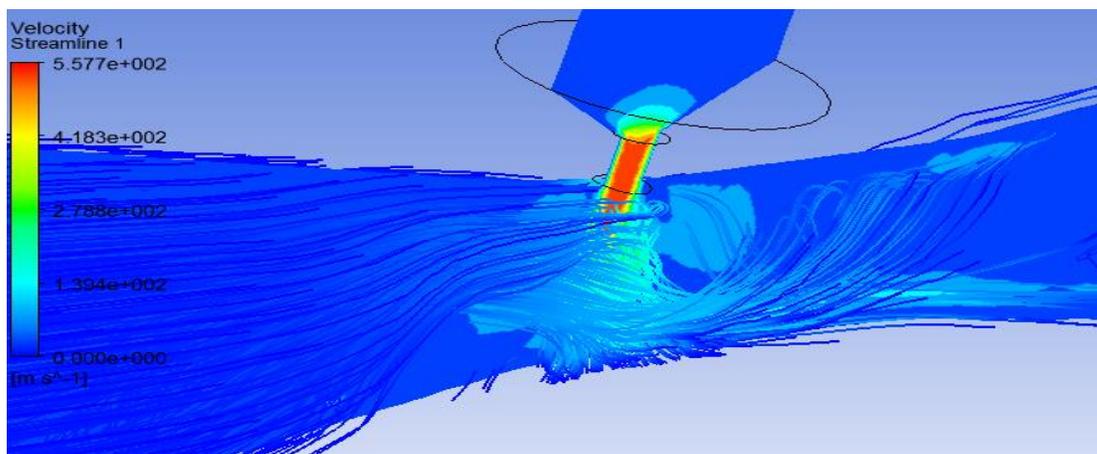
En este caso, la sección interna no presenta cámara de intercambio por lo que el modelo CAD, muestra un Venturi en el que su exterior es semejante a la sección de transporte de fluido, ver Figura 48. Según el código de colores se evidencia que la sección de intercambio está conectada a la entrada del fluido secundario, por lo que se puede intuir que si se aplica una velocidad de entrada ocurriría una obstrucción entre los dos fluidos, efectivamente la Figura 70 refleja que para este diseño no es recomendable colocar una fuerza motriz para el segundo fluido, ya que se generara una velocidad tal que sea capaz de succionar el fluido necesario para el intercambio.

Figura 48. Modelo CAD boquilla Mazzei.



Fuente: Propia.

Figura 49. Obstrucción entre los dos fluidos en la boquilla Mazzei.



Fuente: Propia.

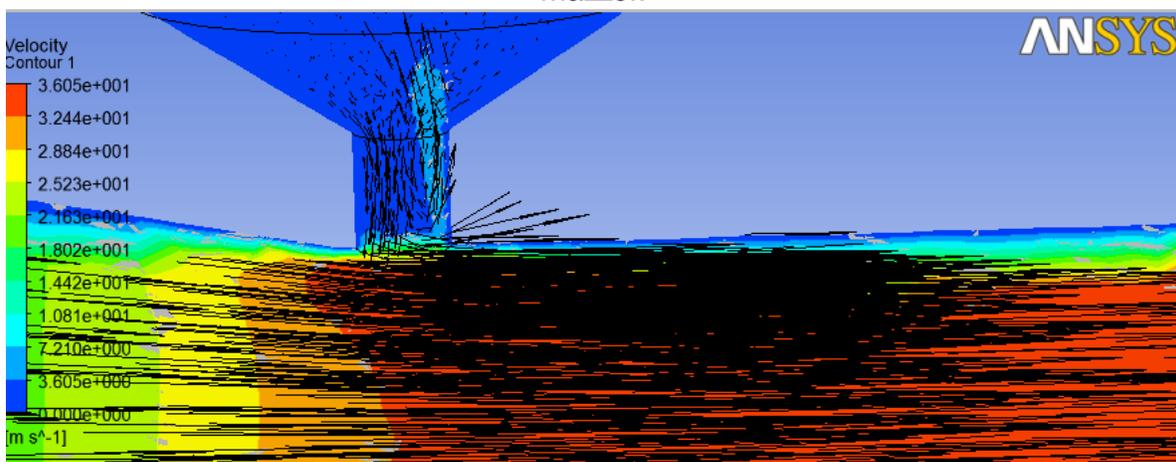
Sin embargo el diseño genera la suficiente succión para vincular el aire en este caso a la corriente del fluido primario con el que se alimenta la boquilla en la Figura 50 se alcanza a observar como las líneas de flujo indican que efectivamente se crea una circulación, a pesar que la velocidad hace que un fluido mínimo intente invadir

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

el orificio de succión, la velocidad que se crea en la cámara de mezcla hace que este se devuelva junto a una porción de aire succionado, un efecto de remolino.

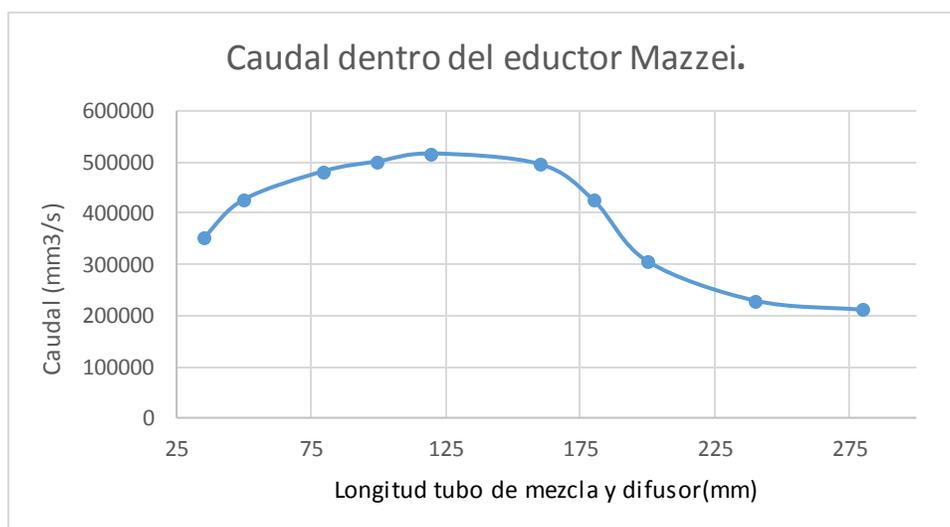
El diseño del eyector de Mazzei está enfocado en generar la máxima velocidad de arrastre del fluido secundario por lo que según el software la máxima velocidad para esta configuración esta alrededor de 24.95 m/s, basado en este parámetro la gráfica de succión Figura 51 muestra que efectivamente en la sección comprendida entre los 140 mm se provoca un incremento de caudal efecto de la succión generada de aire para luego disminuir a medida que se desplaza por el eje axial del dispositivo.

Figura 50. Líneas de flujo representativas del fenómeno de succión boquilla Mazzei.



Fuente: Propia.

Figura 51. Comportamiento del caudal dentro del eductor mazzei.

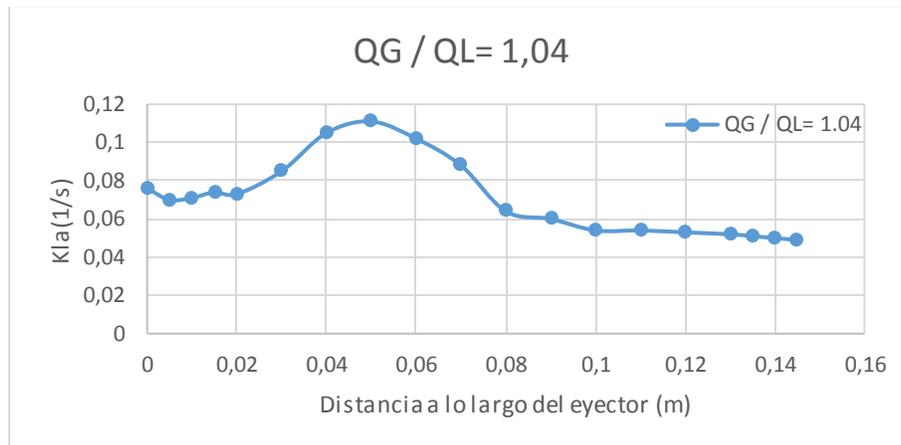


Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Ahora que la simulación indica el comportamiento del fluido dentro del dispositivo mediante la grilla de colores y las líneas de flujo se considerara la evaluación del coeficiente de masa volumétrica, ver Figura 52. En este caso por tratarse de una estructura distinta, se observa que el coeficiente volumétrico se mantiene prácticamente estable a lo largo de la boquilla, puesto que no hay una distancia pronunciada entre la sección de succión y de mezcla.

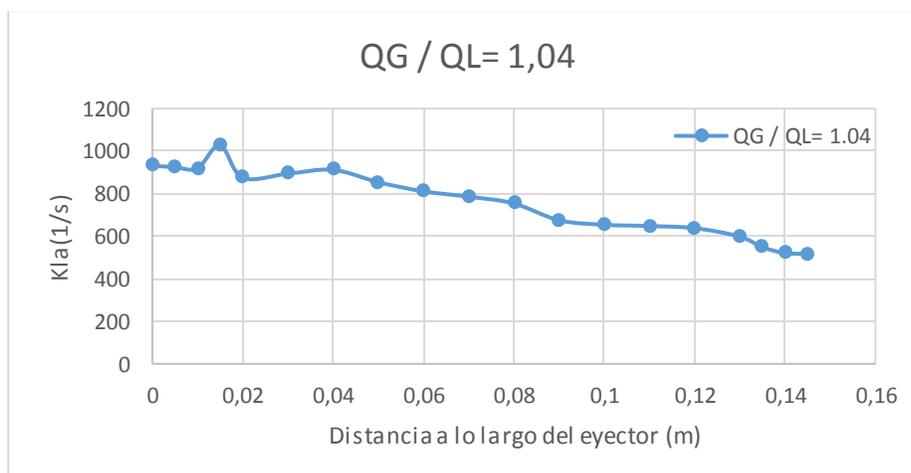
Figura 52. Coeficiente de transferencia de masa volumétrica eje axial del eductor Mazzei.



Fuente: Propia.

El mismo patrón se refleja en la tasa de disipación de energía Figura 53 que señala que cuando la velocidad y el caudal del fluido son bajas la disipación de energía es de igual manera baja, para incrementar en donde se reduce el espacio de transporte y continuando con este comportamiento disminuye a la vecindades de la salida del evector.

Figura 53. Distribución de la tasa de disipación de energía dentro del tubo evector.

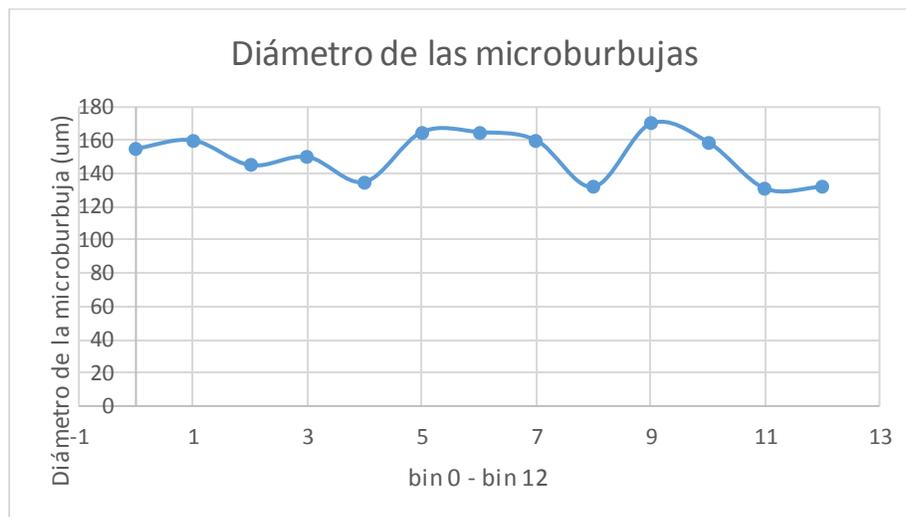


Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Con la evaluación de las fracciones volumétricas y la disipación de la energía dentro del dispositivo Mazzei se finaliza evaluando el comportamiento de este respecto a la tendencia estadística de la generación de microburbujas, tasando los mismos trece índices de clase mediante el solver MUSIG quien resuelve estadísticamente el balance poblacional mortandad o desprendimiento de nuevas microburbujas, este procedimiento arroja un promedio de 150.69 μm , ver Figura 54. Sin embargo debido a la dificultad para establecer los parámetros de la estructura patentada por la compañía Mazzei es probable que los resultados no se ajusten a los que el fabricante manifiesta en su hoja técnica con diámetros de 200-300 μm . Además no se encuentra evaluada en un entorno de trabajo que al estar conectada a una columna tiene que vencer el peso del fluido contenido lo que afectaría el rendimiento del sistema educor. Además en la simulación se ha dejado de lado las características propias del material de construcción.

Figura 54. Tamaños de microburbujas.



Fuente: Propia.

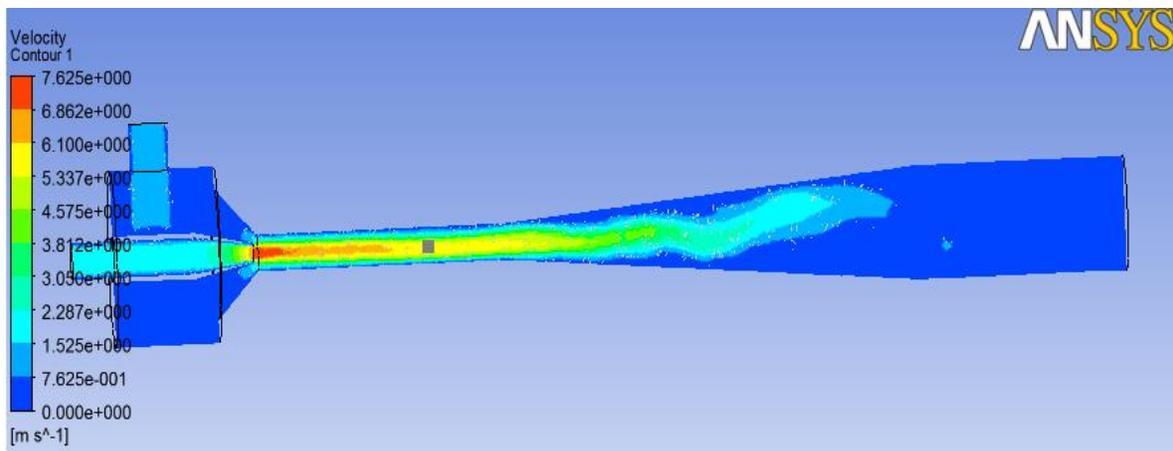
5.3 Construcción CAD de un modelo de eyector como alternativa de mejora

Una vez recreados los resultados del trabajo en [2] y extrapolados a la boquilla Mazzei, se tienen resultados de evaluación para proponer una alternativa de mejora en los dos ámbitos, estructural y de comportamiento dinámico, así que identificadas las secciones internas del educor que reflejen cambios significativos en el desempeño, éstas se redimensionaron con los principios teóricos existentes en el estado del arte y se someten a evaluación numérica para corroborar que efectivamente repercuten en cambios dinámicos significativos.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Para este apartado de la investigación se hace énfasis en la distancia de la tobera a la sección de intercambio como también la relación longitud y diámetro de la zona de mezcla, a continuación la Figura 55 muestra el desempeño del eyector propuesto mediante el código de colores del entorno HMI de FLUENT en el que se refleja la poca distancia entre la salida de la boquilla a la zona de mezcla, con la variación de este parámetro de diseño se evidencia que el chorro en la garganta presenta una continuidad, sin embargo en la sección de difusión el chorro se nota inclinado a la base del eductor, posiblemente porque la longitud de la sección de difusión es más corta.

Figura 55. Boquilla propuesta y recreada mediante ANSYS, con velocidad de entrada 1.6 m/s.



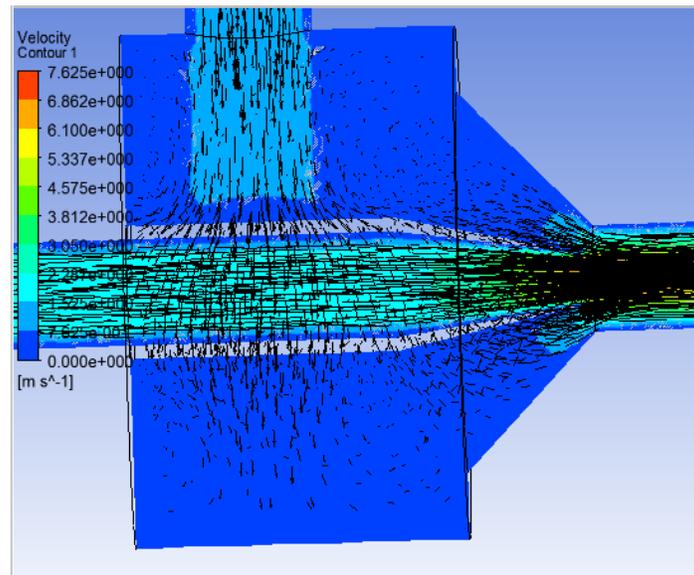
Fuente: Propia.

En cuanto a la velocidad máxima alcanzada por los fluidos dentro de la unidad, ésta oscila alrededor de 22 m/s. Con este máximo valor la capacidad de arrastre del segundo componente se incrementa como lo demuestran las líneas de flujo en cámara de succión Figura 56 indicando que el segundo fluido cubre gran parte del área de succión, para desplazarse hacia la sección de mezclado.

Para diagnosticar el comportamiento dentro de la garganta de mezclado se registran los valores de caudal una vez a superado la zona de succión. La Figura 57 hace referencia al comportamiento del fluido una vez hace contacto con la zona de intercambio mostrando un incremento del caudal y decrecimiento al llegar a la zona de difusión pues en esta el diámetro es mayor por lo que disminuye la velocidad y por ende la capacidad de succión del dispositivo.

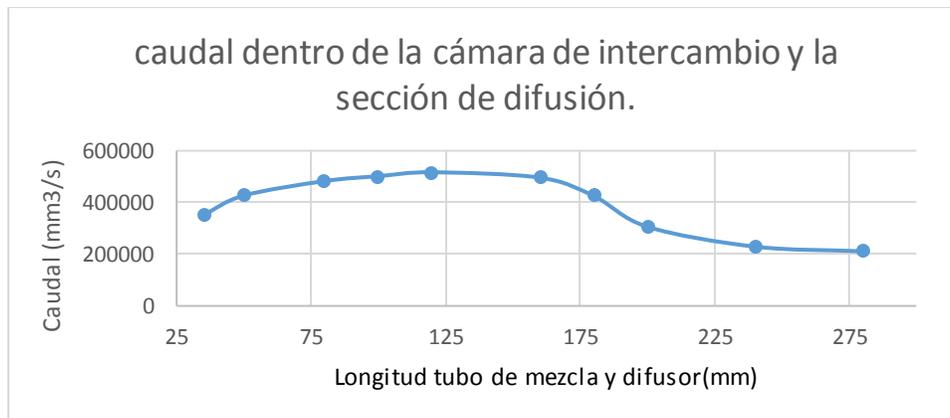
Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Figura 56. Líneas de flujo representativas del fenómeno de succión en la alternativa de mejora.



Fuente: Propia.

Figura 57. Comportamiento del caudal dentro de la cámara de intercambio y la sección de difusión en la alternativa de mejora.

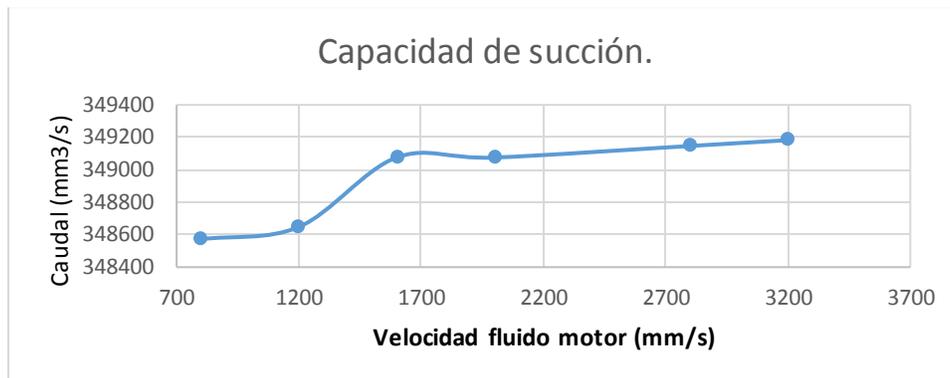


Fuente: Propia.

En la gráfica referente a la capacidad de succión del segundo fluido, Figura 58, se nota que entre una alimentación de 1.2 m/s y 1.7 m/s hay un incremento de la succión para luego estabilizarse a valores superiores, dejando prever que el diámetro del tubo de mezcla influye directamente en el requerimiento de alimentación del eyector, puesto que la capacidad de succión depende también de la alimentación de la boquilla.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

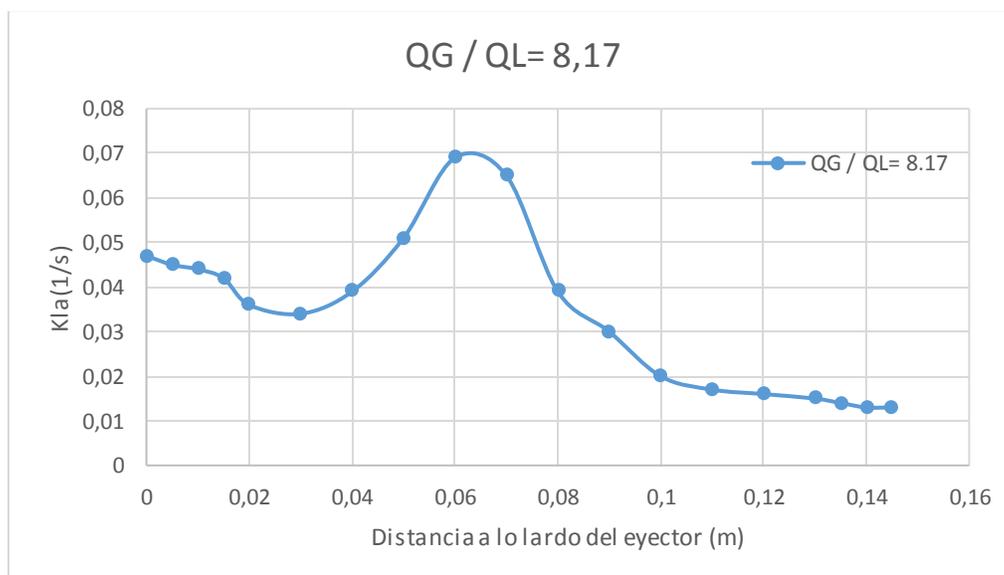
Figura 58. Capacidad de succión del eductor propuesto con variaciones de alimentación motriz.



Fuente: Propia.

Por lo tanto el comportamiento de succión para este dimensionamiento del eductor se continúa evaluando los factores que determinan una dispersión de las partículas de aire inmersas en el fluido de alimentación entre las que se destaca el coeficiente de masa volumétrico, ver Figura 59, tasa de dispersión de energía Figura 60 y la distancia entre la boquilla a la sección de mezclado como la relación de caudales $Q_G/Q_L = 8.17$ y por ultimo evaluar mediante MUSIG el comportamiento dimensional de microburbujas Figura 61 para el eductor propuesto.

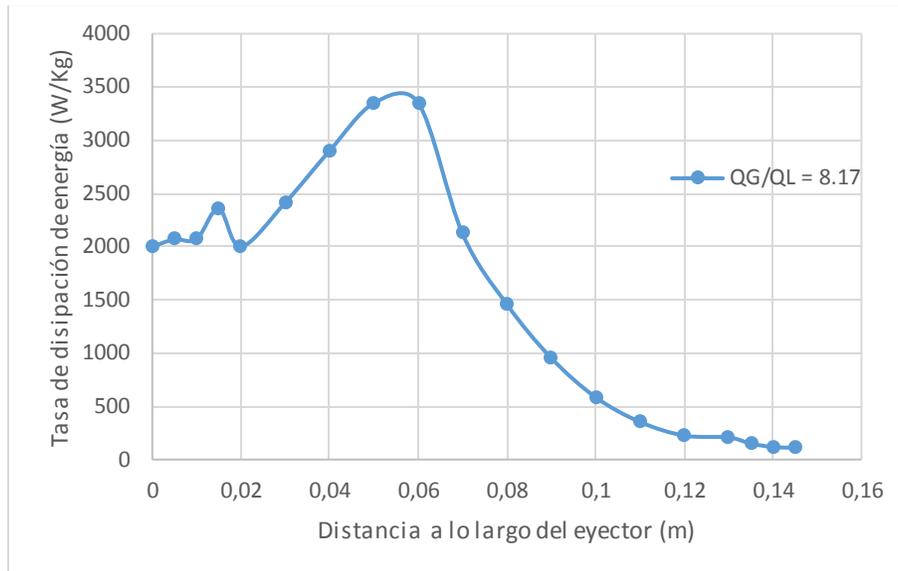
Figura 59. Coeficiente de transferencia de masa volumétrica $Q_G / Q_L=8.71$ eje axial del eductor.



Fuente: Propia.

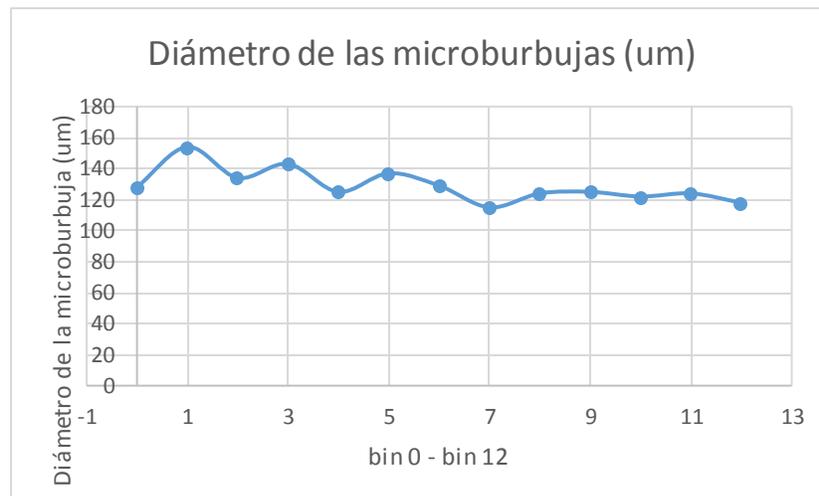
Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Figura 60. Distribución de la tasa de disipación de energía dentro del tubo eyector para $Q_G / Q_L = 8.17$.



Fuente: Propia.

Figura 61. Tamaños de microburbujas.



Fuente: Propia.

Con estas dimensiones de evaluación se puede observar que el software entrega unas dimensiones de microburbujas en promedio 129.07 μm , debido a que hay una mejor disipación de energía y una mayor cantidad de aire dispersado en el fluido contenido dentro del eyector.

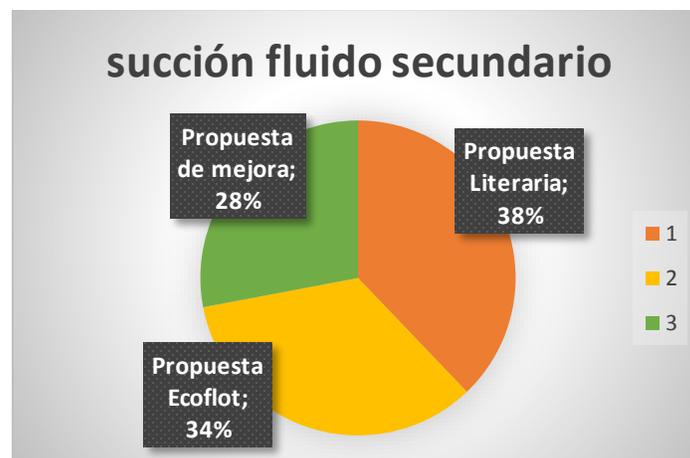
5.4 Verificación mediante simulación DFD de las ventajas del nuevo diseño respecto al sistema de boquillas original, en cuanto a su capacidad para producción de burbujas.

En esta sección se comparan los tres modelos desarrollados mediante el software ANSYS y se lleva a cabo una comparación de los diferentes resultados con el objetivo de verificar cuál de los tres modelos estudiados presenta un mejor desempeño siendo simulados con los mismos parámetros de alimentación. Sin embargo sería interesante hacer una comparación con datos obtenidos de laboratorio pues la simulación arroja datos aproximados y el dimensionamiento del dispositivo Mazzei no tiene todos los parámetros estructurales con los que fue construido, por tratarse de una patente.

Sin embargo las simulaciones se han aproximado a los principios teóricos por lo que en esta sección se llevará a cabo la comparación de parámetros como succión de aire, coeficiente volumétrico, disipación de energía, y tamaños de microburbujas. Pues con estos resultados se puede hacer un balance de eficiencia ya que el desempeño de un sistema de flotación está caracterizado por el diámetro de las burbujas.

En primera estancia se llevará a cabo una comparación de la capacidad de los ductores estudiados para succionar el segundo fluido aire, debido a que las proporciones de éste dentro del dispositivo generador de microburbujas es indispensable para lograr una mezcla dinámica a pesar de que es la distribución de diámetros y longitudes de la zona de mezclado la que se encarga de generar una mezcla ideal para la generación de microburbujas.

Figura 62. Capacidad de succión de las boquillas estudiadas.

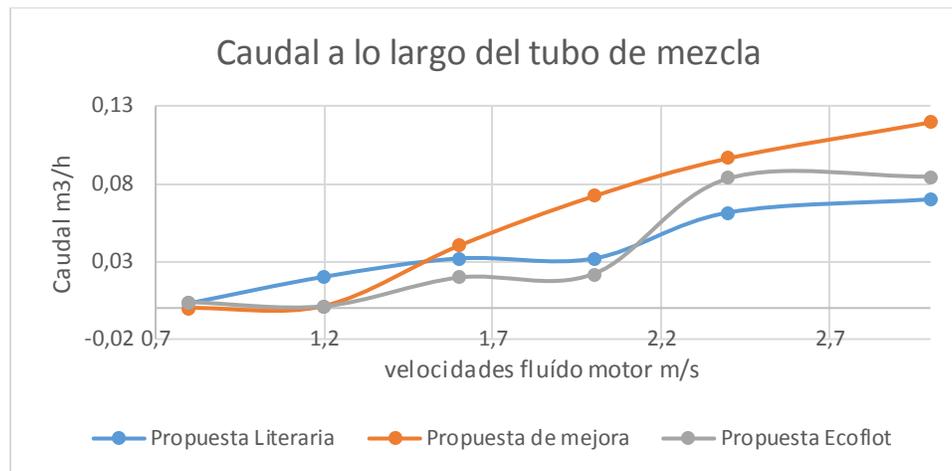


Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

En la Figura 62, según la interpretación del software, se puede evidenciar que la boquilla de la propuesta literaria es la que alcanza una mayor succión del segundo fluido, en este caso aire.

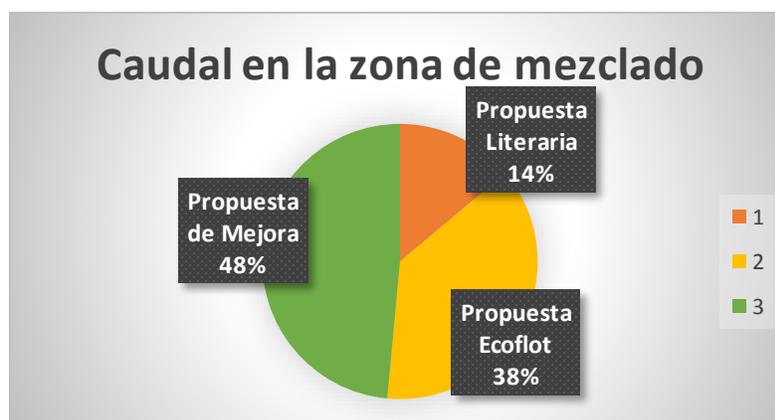
Figura 63. Capacidad de succión de las boquillas estudiadas a diferentes velocidades de alimentación.



Fuente: Propia.

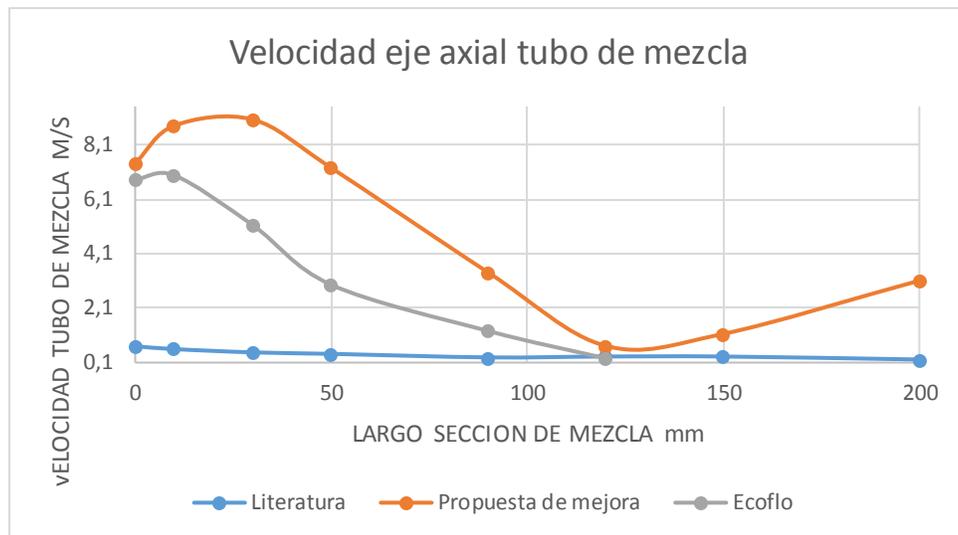
La succión del segundo fluido no es una diferencia tan notable entre los eductores propuestos por lo que se continua evaluando el comportamiento de los dispositivos en la sección de mezcla, otra característica importante en el diseño de este tipo de dispositivos, pues la literatura apunta a que es en esta sección en donde se crea un comportamiento importante debido a la dinámica de los componentes y la estructura física que repercute en los anteriores, dada esta inquietud se evalúa la sección de mezclado intentando calcular la mitad de la longitud axial de la garganta de intercambio, puesto que para cada dispositivo tiene un diámetro distinto y se conserva la misma velocidad de fluido motor.

Figura 64. Caudal en la zona de mezclado de los dispositivos estudiados.



Fuente: Propia.

Figura 65. Velocidad del fluido a lo largo de la sección de mezclado de las boquillas estudiadas.



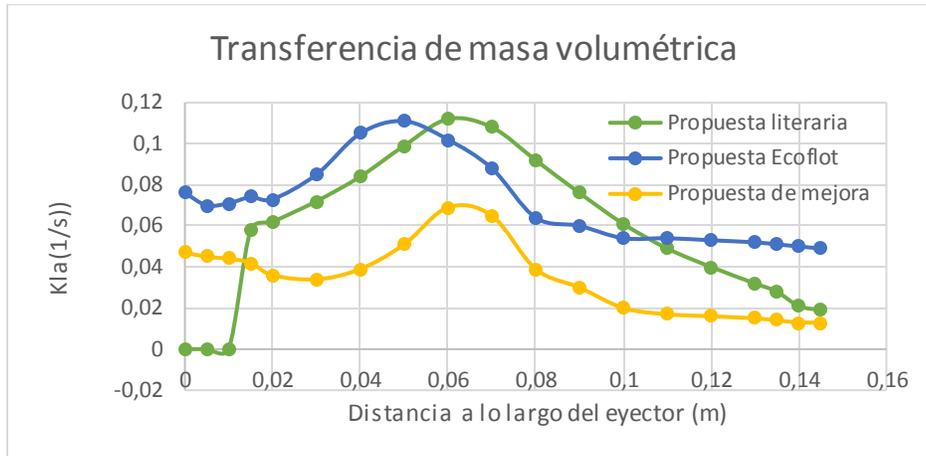
Fuente: Propia.

Estos resultados están estrechamente vinculados en la selección de la entrada del fluido motor, pues en la literatura se indica la posibilidad de simular el dispositivo desde la salida de la boquilla D_N , sin embargo indicándole al simulador que el fluido motor tiene un recorrido previo, este logra identificar la aceleración que ocurre una vez superada la salida de la boquilla y la sección de succión, manifestando un comportamiento representativo de la ley de Bernoulli, al disminuir el diámetro aumenta la velocidad y disminuye la presión, por este motivo se puede argumentar el bajo desempeño de la propuesta literaria respecto al caudal y velocidad que tienen su efecto dentro de la cámara de intercambio.

Con esta apreciación se continúa evaluando el efecto del coeficiente de transferencia de masa volumétrica en el eje axial de los eductores para la misma relación de velocidad de flujo motriz, pues el caudal ha variado debido a que los diámetros son distintos para cada dispositivo, sin embargo se puede concluir que las dimensiones del tubo mezcla influye en el coeficiente de transferencia de masa volumétrica de un eyector pues el dispositivo usado por ecoflot presenta un mayor diámetro y en la Figura 66 ocurre un incremento en la sección de menor diámetro y a medida que el fluido llega a la zona de difusión la transferencia de mezcla nuevamente tiende a ser idéntica a la que ocurre antes de entrar a la zona de menor diámetro.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

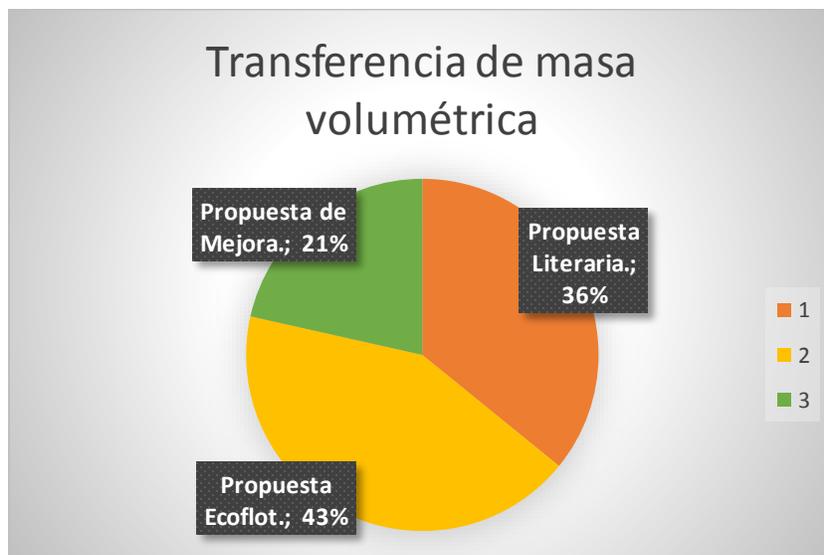
Figura 66. Coeficiente de transferencia de masa volumétrica en los educutores estudiados.



Fuente: Propia.

La Figura 67 hace referencia al mismo efecto de transferencia volumétrica en el recorrido más estrecho señalando que efectivamente entre mayor sea el diámetro mayor será este valor, puesto la relación de caudal es directamente proporcional al diámetro del dispositivo conductor, y efectivamente el dispositivo implementado por Ecoflot es de mayores proporciones.

Figura 67. Porcentajes del Coeficiente de transferencia de masa volumétrica en los educutores estudiados.

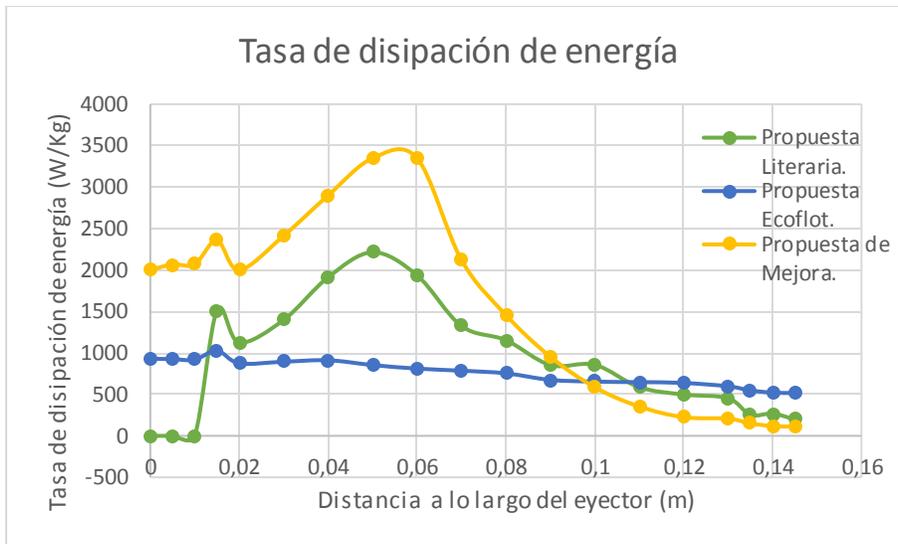


Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

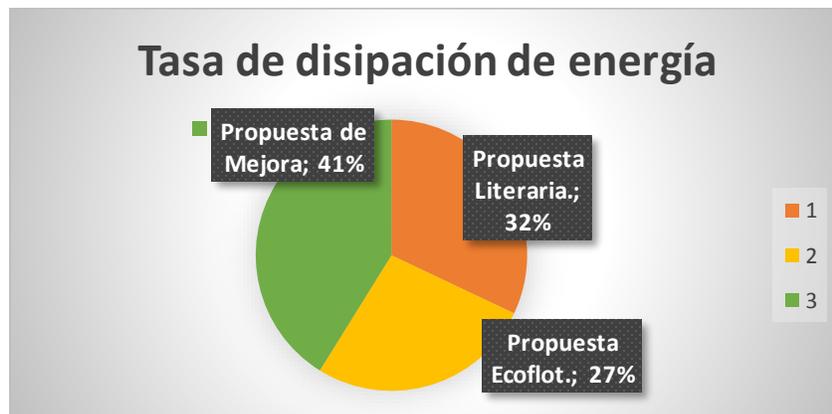
Sin embargo este fenómeno se invierte en la evaluación de la tasa de disipación de energía Figura 68 y Figura 69 en las cuales se observa que hay una elevación de este valor en la sección más estrecha pues es allí en donde se incrementa la velocidad, pero una vez superado el momento de mayor aceleración los dispositivos regulan este fenómeno en lo que el dispositivo propuesto presenta un buen desempeño, al incrementar en un pequeño tramo la máxima cantidad de energía para continuar en un decaimiento hacia la zona de convergencia del sistema, corroborando con el principio teórico que afirma que existen dos parámetros que afectan al diámetro de la burbuja: la tensión superficial y la velocidad media de disipación de energía cinética turbulenta [4].

Figura 68. Distribución de la tasa de disipación de energía en los e ductores estudiados.



Fuente: Propia.

Figura 69. Porcentaje de la distribución de la tasa de disipación de energía en los e ductores estudiados.

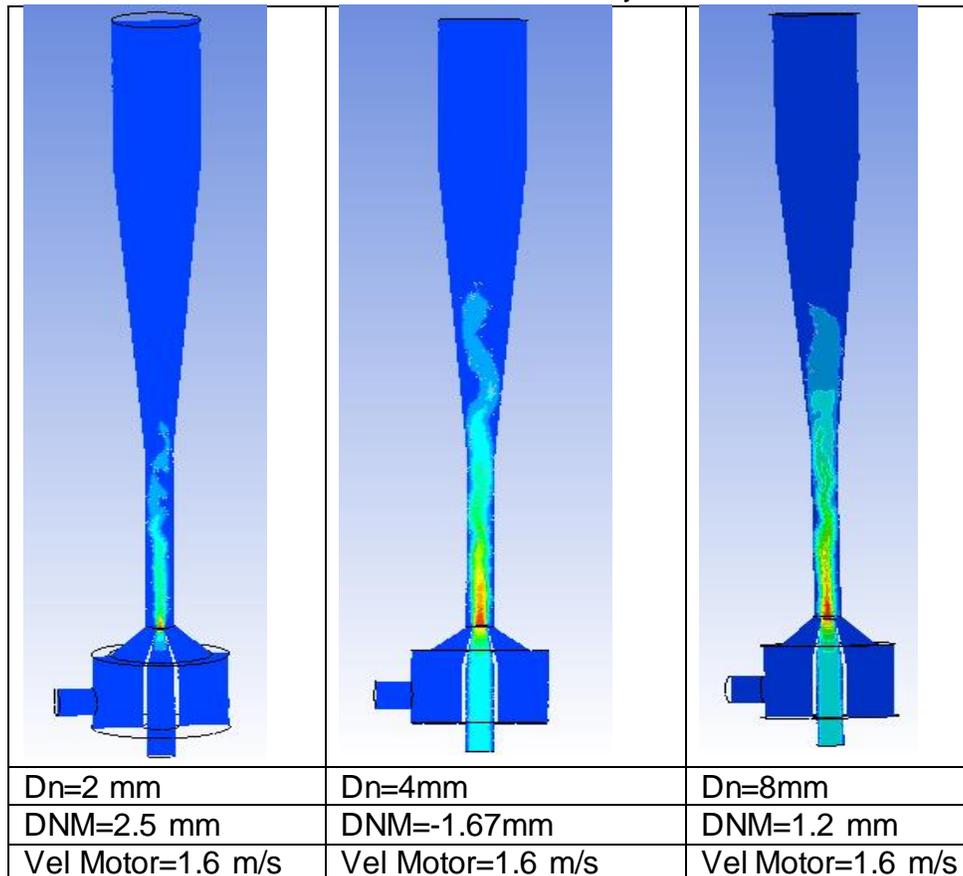


Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Continuando con los aportes literarios acerca de los fenómenos dinámicos que afectan la creación de microburbujas, se observa en la Figura 70 que el diámetro de la boquilla dentro de la cámara de succión D_N y la distancia L_{TN} de ésta hacia el tubo de mezcla muestran una relación concluyente en el desempeño del sistema, puesto que a diámetros superiores se evidencia según la simulación un comportamiento de mayores variaciones respecto a la aceleración, incremento de caudal y mayor intercambio energético dentro de la sección de mezclado siendo estos fenómenos determinantes para la generación o no del efecto choque, que en últimas es el encargado de generar el desprendimiento de partículas en el lugar específico dentro del tubo de mezclado, pues como lo manifestó [35], [1] si este fenómeno ocurre después incurre en un bajo desempeño del dispositivo generador. Y efectivamente se evidencia que para valores de $D_N = 2$ mm y una distancia $L_{TN}=2.5$ mm dentro de la sección de intercambio se presenta un menor efecto turbulento, un rápido equilibrio energético y un efecto de choque en las vecindades con la sección de difusión, fenómenos concluyentes para un desempeño óptimo de un dispositivo generador de microburbujas.

Figura 70. Disipación de energía cinética turbulenta según FLUENT para cambios en la distancia boquilla sección de mezcla y diámetro en la boquilla propuesta como alternativa de mejora.



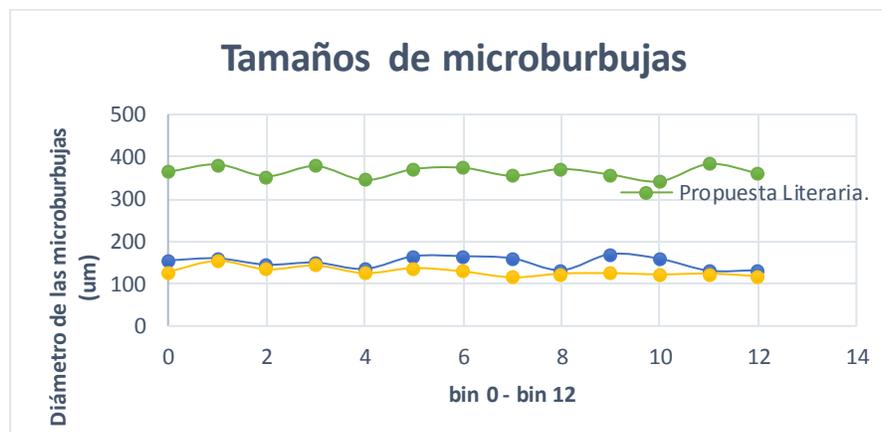
Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Por último se lleva a cabo la comparación de los tamaños medios de las microburbujas según la evaluación de balance poblacional que se le aplicó a cada educador, para hacer una comparación la cual presentó un mejor desempeño en cuanto al diámetro medio de microburbujas generadas, puesto que este parámetro es directamente proporcional a la eficiencia de desempeño que tendrá un sistema de flotación por inducción de aire, que es el objetivo primordial en la evaluación de una boquilla de succión. Y efectivamente en la Figura 71 se refleja que el comportamiento del educador propuesto por ecoflot y por esta investigación respecto al diámetro de las microburbujas, presentan una gran afinidad respecto al tamaño, primero que todo el resultado arrojado por el solver PBM es cercano al diámetro estipulado en la hoja técnica de Mazzei lo que refleja el buen desempeño del software

ansys para evaluar este tipo de sistemas, y segundo que el diámetro arrojado al diagnosticar la boquilla propuesta está por debajo de los resultados del educador mazzei, lo que augura que el diseño y las bases teóricas están bien fundamentadas, a pesar de que las diferencias respecto a diámetros no son tan significativas se da cumplimiento a la pregunta de investigación de este proyecto de tesis, pues si es posible proponer una mejora del sistema de generación de microburbujas respecto a la generación de microburbujas.

Figura 71. Tamaños de microburbujas en los educadores estudiados.



Fuente: Propia.

En cuanto a la comparación de eficiencia entre los educadores para producir microburbujas, se refleja en la Figura 71 que los rangos son competitivos según la literatura, pues entre menor sea el diámetro, mayor será la capacidad para adherirse a los sólidos flotados y generar el efecto empuje hacia la superficie del dispositivo contenedor, sin embargo hay dos características que hay que apuntar, la primera referente a los tamaños de burbujas superiores mostrados por el educador que se usó como representante de los artículos académicos, y es que la mayoría de ellos evalúan el dispositivo después de la boquilla, lo que le restringe tomar una aceleración previa al fluido, por lo que las velocidades reflejadas en la cámara de

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación
por Inyección de Gas

intercambio son menores, y esto es directamente relacionado con el caudal y así sucesivamente con la turbulencia, la energía y así se va perdiendo los datos acordes a lo que sería un comportamiento real, en últimas el software no tiene los datos precisos para poder hacer la aproximación y se refleja en datos por fuera de los esperados. Y la segunda apreciación es que los eductores fueron evaluados sin estar conectados a la totalidad del sistema de flotación, por lo que las presiones de salida no tienen ninguna obstrucción a vencer, es posible que la estar conectados a todo un sistema de tratamiento los diámetros de las burbujas sean superiores, pues el coeficiente volumétrico variará y por ende los caudales y velocidades, y la capacidad de disipación de energía de los eductores con variaciones en el lugar en donde ocurrirá el efecto choque y desencadenara una variación en los tamaños de las microburbujas.

Para evaluar la eficiencia de los dispositivos simulados expresando la energía en términos de presiones y caudales se acude al planteamiento de Fredrik Liknes [5] ecuación (29) y (30), con los resultados de velocidad y caudales obtenidos en la evaluación software CFD a los que fueron sometidos los tres modelos se puede hacer una comparación Tabla 14 en la que se consigue notar que la propuesta de mejora presenta una mejor eficiencia, y también la propuesta literaria , con lo que se puede asegurar que la evaluación computacional que se le aplico a esta última no fue la adecuada. Y respecto a la boquilla mazzei ha mostrado un resultado de baja eficiencia a pesar de mostrar un mejor resultado en las otras evaluaciones

Tabla 14. Eficiencia de las boquillas estudiadas.

Propuesta literaria	Propuesta ecoflot	Propuesta de mejora
$\eta=0.0305$ $\eta = 3.05\%$	$\eta = 0.00733$ $\eta = 0.73\%$	$\eta = 0.0710$ $\eta = 7.0\%$
$pd = 0.0022 Pa$ $ps = -0.3034 Pa$ $pn = 1.2869 Pa$ $Q1 = 0.3041 m^3/h$ $V1 = 1.6 m/s$ $R1 = 0.0041 m$ $Q2 = 0.3887 m^3/h$ $V2 = 0.022 m/s$ $R2 = 0.0125 m$	$pd = -7.05311 Pa$ $ps = -32.0206 Pa$ $pn = 16.732 Pa$ $Q1 = 7.012020 M^3/h$ $V1 = 1.6 m/s$ $R1 = 0.01966 m$ $Q2 = 0.04904 m^3/h$ $V2 = 0.0114 m/s$ $R2 = 0.01966 m$	$pd = -1.81348 Pa$ $ps = -845.792 Pa$ $pn = 2233.61 Pa$ $Q1 = 7.0120 m^3/h$ $V1 = 1.6 m/s$ $R1 = 0.0196 m$ $Q2 = 1.32010 m^3/h$ $V2 = 0.30122 m/s$ $R2 = 0.0196 m$

Fuente: Propia.

Es notable que el margen de eficiencia es muy bajo y es una característica de este tipo de sistemas, por lo que su utilidad se va restringiendo específicamente a sectores en los que no se puede demandar de energías externas, ya sea porque no

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

hay generadores o porque el medio no lo permite como en este caso de investigación en donde los materiales a tratar son ampliamente volátiles.

5.5 Resultados

Después de llevar a cabo el proceso de comparación entre los dispositivos generadores de microburbujas, sometidos a condiciones idénticas respecto a alimentación y procesamiento computacional, se han obtenido resultados referentes a capacidad de succión, eficiencia, tamaños de microburbujas. Siendo estos factores claves tanto de la investigación planteada como de rendimiento en un sistema de separación por flotación, en la Tabla 15 se lleva a cabo una comparación de resultados de las boquillas, en las que se evidencia sus mejoras y deficiencias respecto al desempeño de las otras boquillas evaluadas.

Tabla 15. Comparación de resultados entre las boquillas evaluadas mediante fluent.

Parámetro evaluado	Propuesta Literatura	Propuestas Ecoflot	Propuesta mejora
<i>Relación Qaire/Qagu</i>	2.33 m ³ /h	1.04 m ³ /h	8.17 m ³ /h
<i>Relación LT/DT</i>	3.26 mm	1.45 mm	7.5 mm
<i>Relación L_{TN}</i>	7.5 mm	xxxx	1.67 mm
<i>Diámetro de la boquilla</i>	25 mm	19.6 mm	16 mm
Tamaño microburbuja	364 μ m	150.69 μ m	129.07 μ m
Succión aire	0.38 m ³ /h	0.04 m ³ /h	1.32 m ³ /h
Eficiencia	3.05 %	0.73 %	7 %
<i>Velicidad Max en Garganta</i>	13.172 m/s	24.95 m/s	22 m/s
Ruptura del chorro en la gargan	83 mm Aprox	130mm Aprox	83 mm Aprox
<i>Longitud de la ganta</i>	150 mm	50 mm	120 mm
Transferencia de masa volumetrica	36 %	43 %	21 %
Tasa de disipación de energía	32 %	27 %	41 %

Fuente: Propia.

Es evidente que la evaluación indica una generación de microburbujas de menor diámetro, con lo que se aseguraría que el proceso de separación incrementaría su eficiencia, pues como la literatura lo constata el diámetro de las microburbujas entre menor sean sus dimensiones aumenta la probabilidad de contacto entre las partículas flotadas, y además la cantidad de fluido succionado se verá reflejado en una mejor dispersión de microburbujas en la zona de difusión por ende con una mayor eficiencia respecto a la remoción sin embargo un factor clave aun poco explorado es el rompimiento del chorro generado en la garganta, pues este está

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

relacionado con la cantidad de aire succionado y la transferencia de masa volumétrica, como la tasa de disipación de energía, a pesar de que el software es una aproximación hasta ahora poco confiable los datos demuestran que el dispositivo propuesto presenta un rompimiento dentro del tubo de mezcla, a los 83 mm igual que la propuesta literaria, pero con la diferencia que la sección de mezclado para el caso propuesto es más corta, y respecto a la propuesta de Ecoflot el rompimiento se está generando a los 130 mm, constatando que la cámara de intercambio para este es de tan solo 50 mm y estaría ocurriendo este fenómeno de choque fuera de la zona de difusión, lo que indica el por qué en la evaluación la disipación de energía mostro su valor más bajo 27% como también si eficiencia de tan solo 0.73%

Con esta observación también se establece la importancia de una buena relación Q_{aire}/Q_{agua} y LT/DT (longitud del tubo mezcla sobre diámetro del mismo). Pues es evidente según la Tabla **15** para mayores valores se obtiene una mayor succión de aire y una menor transferencia de energía, que también se relaciona con la eficiencia del dispositivo generador de microburbujas.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

La investigación realizada evidencia, en primer lugar, poca formalidad y escasez de la información referida a cada uno de los componentes y al comportamiento o funcionamiento conjunto del sistema ECOFLOT, no se cuenta con la documentación técnica que permita explotar al 100% las características positivas de la patente, este hecho dificulta cualquier punto de partida para mejoras o nuevas implementaciones en el sistema. En segundo lugar, se pudo identificar la necesidad de llevar a cabo buenas practicas (incluyendo tecnología eficiente) en el manejo de aguas producidas (separación crudo-agua) por cuanto se incrementan los niveles de competitividad de la compañía y se contribuye con el sostenimiento medioambiental.

El comportamiento del sistema ECOFLOT en términos generales, posee buenos niveles de eficiencia dado que, como “garantía”, se aplican las características más importantes de sistemas consolidados en el manejo de aguas residuales como lo son los “sistemas de flotación por aire/gas inducido” (IAF) y los “sistemas de flotación por aire/gas disuelto” (DAF), este hecho, junto a la adaptación particular a los campos petroleros de ECOPETROL S.A, han permitido consolidar una herramienta de alto potencial en la generación de microburbujas mediante la inyección de aire o gas, procedimiento que mejora la complicada “zona de tratamiento secundaria” en la que se manejan contenidos residuales con diámetros muy pequeños (del orden de micrómetros) y donde la separación de sólidos suspendidos, grasa y aceite se hace supremamente complicada.

A pesar de que la técnica de flotación por aire disuelto puede clasificarse como “más efectiva” que la flotación por aire inducido (técnica implementada en el sistema ECOFLOT), la reducción de costos en instrumentación, control y consumo energético, justifican y viabilizan el diseño desarrollado para ECOFLOT.

La simulación con la herramienta software ANSYS WORKBENCH, en la que se reprodujo el comportamiento de los fluidos, a nivel interno, tanto para la boquilla implementada por ECOFLOT (Mazzei 484), la tomada basándose en la literatura y la propuesta, permitió evidenciar un comportamiento acorde a las especificaciones teóricas obtenidas y confirmó el mejor desempeño de las boquillas propuesta y mazzei.

Lamentablemente, por falta de información y la reserva del desarrollo ECOFLOT por tratarse de una “patente”, no se pudo llevar a cabo la simulación del

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

comportamiento del sistema conjunto en la herramienta software, sin embargo, a manera personal, se desarrolló la simulación de una columna de burbujeo Anexo C provista de una boquilla cilíndrica de 2mm de diámetro y a la que se le aplicó una velocidad de entrada del gas de 6 m/s, configuración que arrojó como resultado la factibilidad de la formación de burbujas de cierto tipo y que puede servir para hacer un estudio exhaustivo de este tipo de sistemas.

El trabajo desarrollado en esta monografía, permitió visualizar las posibilidades de mejoramiento que puede tener el sistema ECOFLOT y en términos generales los sistemas de separación agua-crudo por técnicas de flotación mediante la inyección de gas. Además, este trabajo constituye el punto de partida para la implementación del sistema ECOFLOT mejorado, a nivel de laboratorio en principio, y posteriormente las implementaciones industriales a las que haya lugar.

Al emprender futuras investigaciones referentes a la simulación de micro burbujas y su comportamiento, es indispensable tener en cuenta los recursos computacionales y realizarlas en computadores de escritorio, pues estos presentan un sistema de refrigeración más eficiente.

Se llega a la conclusión de que el código comercial ANSYS FLUENT es una herramienta muy válida y útil, para el estudio de este tipo de sistemas. Pues ha logrado recrear burbujas físicamente caracterizadas por los modelos propuestos por **Reynolds, Eotvos y Morton. Anexo C**

Respecto a la configuración del software para evaluar fracciones volumétricas hay que tener en cuenta el número de Courant por el cual se evalúa la celeridad de lagrange para ondas cortas, por ende si su tiempo de evaluación es muy largo asume que hay una divergencia abortando la simulación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Utomo, Z. Jin, M. Rahman, H. Jeong, and H. Chung, "Investigation on hydrodynamics and mass transfer characteristics of a gas-liquid ejector using three-dimensional CFD modeling," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 9, pp. 1821–1829, 2008.
- [2] D. Patel, A. Chaudhari, A. Laari, M. Heiliö, J. Hämäläinen, and K. Agrawal, "Numerical Simulation of Bubble Coalescence and Break-Up in Multinozzle Jet Ejector," *J. Appl. Math.*, vol. 2016, 2016.
- [3] L. LI, J. LIU, L. WANG, and H. YU, "Numerical simulation of a self-absorbing microbubble generator for a cyclonic-static microbubble flotation column," *Min. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 88–92, 2010.
- [4] H. Yang, H. Ye, S. Zhai, and G. Wang, "Gas–liquid numerical simulation on micro-bubble generator and optimization on the nozzle-to-throat spacing," *2011 Int. Symp. Adv. Control Ind. Process.*, no. May, pp. 258–261, 2011.
- [5] F. Liknes, "Jet Pump," no. June, p. 122, 2013.
- [6] J. A. Carillo Pérez, "Diseño Conceptual de una Planta para el Tratamiento y Disposición Final de Aguas de Producción, Provenientes del Camo Aguasay en el estado Monagas," Universidad de Oriente, 2010.
- [7] M. estupiñan; Robinson Andres and M. N. Henry Oswaldo, "Metodologia Para el Manejo de Aguas de produccion en un Campo Petrolero," Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [8] V. MARTÍNEZ-GÓMEZ and R. PÉREZ-GARIBAY, "Flotación de partículas finas utilizando microburbujas."
- [9] J. Melrose, R. Perroy, and S. Careas, "Definición de estándares operativos para el tratamiento de aguas residuales," *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, vol. 1, 2015.
- [10] MARTHA ROCIO CASTRO CASTELL, "Estado del arte de sistemas de tratamiento de aguas de producción en campos petroleros," 2004.
- [11] J. E. . D. J. Forero, "Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamieto de aguas industriales."
- [12] L. Alberto and E. Torres, "Diseño conceptual para la construcción de una planta de tratamiento e inyección de agua en el Campo Cantagallo," p. 194, 2008.
- [13] H. L. Garcia, "Simulación De Los Ciclos De Luz Y Oscuridad En Un Fotobiorreactor Tipo Columna De Burbujeo Usando Cfd.," 2010.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

- [14] “Nikuni KTM Series Pumps.” [Online]. Available: <http://www.nikuni.co.jp>.
- [15] P. Solutions, “Bombas multifase para procesos Daf.” [Online]. Available: <http://www.tromba-sa.com.ar>.
- [16] A. C. Modelo, “Valvula de aguja para alta presión modelo .” [Online]. Available: <http://www.vayremex.com/>.
- [17] D. Industry, “Difusor de membrana,” 2015. .
- [18] “Difusor micro-poroso BST | BossTech.” [Online]. Available: <http://bosstech.pe/tratamiento-secundario/difusor-micro-poroso-bst>.
- [19] Universidad Del Cauca and D. De Hidráulica, “Estudio Y Patronamiento De Orificios Y Boquillas. Lab III,” pp. 1–16.
- [20] M. E. C. Anica, “Estudio fluido dinámico de un equipo lavador de aire por medio de burbujeo en un medio acuoso para utilizar en recintos abiertos.”
- [21] “DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y DE PRODUCCION EVALUANDO LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS NACIONALES Y EXTRANJERAS-CAMPO COLORADO.” [Online]. Available: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/688/2/129404.pdf>. [Accessed: 29-Jul-2015].
- [22] J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, “Análisis del inyector Venturi y mejoras de su instalación en los sistemas de riego localizado,” *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, vol. 1, 2015.
- [23] A. Shah, I. R. Chughtai, and M. H. Inayat, “Experimental and numerical analysis of steam jet pump,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 37, no. 10, pp. 1305–1314, 2011.
- [24] Dr. Diosdado Pérez Franco., “Equipos de Bombeo.” [Online]. Available: <http://galeon.com/elregante/eyector.html>.
- [25] L. Bokányi and B. Csöke, “Preparation of clean coal by flotation following ultra fine liberation,” *Appl. Energy*, vol. 74, no. 3–4, pp. 349–358, 2003.
- [26] J. Manzano Juarez, “Análisis del inyector Venturi y mejora de su instalación en los sistemas de riego localizado,” no. August, p. 213, 2008.
- [27] E. Dimofte, F. Popescu, and I. V Ion, “Numerical modelling of flow in the eductor Pump.,” pp. 13–17.
- [28] S. M. S. S. y J. O. da S. Cláudio M. Vaz, “Clarificación De Meladura Por Flotación,” pp. 1–8.
- [29] J. H. Witte, “Mixing shocks in two-phase flow,” *J. Fluid Mech.*, vol. 36, no. 4, p. 639, 1969.
- [30] R. G. Cunningham and R. J. Dopkin, “Jet Breakup and Mixing Throat Lengths for the Liquid Jet Gas Pump,” *J. Fluids Eng.*, vol. 96, no. 3, pp. 216–226, 1974.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

- [31] A. P. Vi, "The performance and modeling of liquid jet gas pumps," vol. 9, no. 2, 1988.
- [32] R. F. Martín, R. Salcedo, "Medida de caudales-Tema III," *Univ. Alicante*, pp. 1–21, 2011.
- [33] O. Forero sanabria, jorge Enrique;Diaz Sierra, javier;Ortiz Cancino, "Bubble-Generation system Immersed In A Liquid-Processing Tank," 2008.
- [34] R. Ecopetrol, "Bases de diseño sistema Ecoflot." 2010.
- [35] P. H. M. R. Cramers and A. A. C. M. Beenackers, "Influence of the ejector configuration, scale and the gas density on the mass transfer characteristics of gas-liquid ejectors," *Chem. Eng. J.*, vol. 82, no. 1–3, pp. 131–141, 2001.
- [36] J.-E. Lee, W.-S. Choi, and J.-K. Lee, "A study of the bubble properties in the column flotation system," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 20, no. 5, pp. 942–949, 2003.
- [37] T. Sriveerakul, S. Aphornratana, and K. Chunnanond, "Performance prediction of steam ejector using computational fluid dynamics: Part 1. Validation of the CFD results," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 46, no. 8, pp. 812–822, 2007.
- [38] S. B. Riffat and S. A. Omer, "CFD modelling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid," *Int. J. Energy Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 115–128, 2001.
- [39] J. O. Hinze, "Fundamentals of the hydrodynamics mechanisms of splitting in dispersion process," *AIChE J.*, vol. 1, no. 3, pp. 289–295, 1955.
- [40] C. A. M. C. Dirix and K. van der Wiele, "Mass transfer in jet loop reactors," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 45, no. 8, pp. 2333–2340, 1990.
- [41] A. De Saavedra, "Proyecto Fin de Carrera Study and review of the current understanding of models for the simulation of vertical turbulent bubbly flow with CFD," no. Plan 98.
- [42] D. S. García, "Hidrodinámica entre dos burbujas en fluidos no-newtonianos," Universidad Nacional Autónoma de México.
- [43] I. L. M. Ignacio, "Análisis fluido dinámico de un flujo de burbujas mediante cfd," Universidad de Chile., 2015.
- [44] M. E. Clift, R., Grace, J.R., Weber, *Bubbles, Drops and Particles*, vol. 94, no. 4. Montreal,Quebec, CANADA, 1978.
- [45] E. A. Agurto sanchez, "Mejoras en el Tratamiento de Aguas de Inyección Para Campos Maduros de Petróleo Usando Microburbujas de Gas Natural.," Universidad Nacional de Ingenierías, 2009.
- [46] G. S. Colotta, "Proceso de flotación por aire disuelto en el tratamiento de agua residual de bombeo en la industria de harina de pescado." pp. 60–68, 2003.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

- [47] W. Separation, "Oil and Water Separation," *Miner. Metall. Process.*, vol. 4, pp. 1548–1556, 2000.
- [48] S. Croquer, S. Poncet, and Z. Aidoun, "Turbulence modeling of a single-phase R134a supersonic ejector. Part 2: Local flow structure and exergy analysis," *Int. J. Refrig.*, vol. 61, pp. 153–165, 2015.
- [49] C. Beltrán, O. Napoleón, and J. Eulate, "Aplicación de microburbujas en la flotación de lodos de tratamiento de aguas ácidas de mina. Parte II: Flotación," *Rev. Met. N°*, vol. 32, 2012.
- [50] M. L. T. Cossio, L. F. Giesen, G. Araya, M. L. S. Pérez-Cotapos, R. L. VERGARA, M. Manca, R. A. Tohme, S. D. Holmberg, T. Bressmann, D. R. Lirio, J. S. Román, R. G. Solís, S. Thakur, S. N. Rao, E. L. Modelado, A. D. E. La, C. Durante, U. N. A. Tradición, M. En, E. L. Espejo, D. E. L. A. S. Fuentes, U. A. De Yucatán, C. M. Lenin, L. F. Cian, M. J. Douglas, L. Plata, and F. Héritier, *Floation Technology*, vol. XXXIII, no. 2. 2012.
- [51] F. Casas, "Caracterización de los Sistemas de Tratamiento de Riles en la Industria Lechera y Propuestas de Mejora," 2009.
- [52] P. Landázuri, Paúl/Salguero, "Clarificación de agua de producción para su inyección por flotación inducida con microburbujas," Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2006.
- [53] L. De Vargas, "Plantas de Filtración Rápida," *Manual I: Teoría*. Lima, Perú, pp. 64–80, 2006.
- [54] Antoine and Wilhelmus, "Path and wake of a Rising Bubble," 2001.
- [55] E. Delnoij, F. a. Lammers, J. a. M. Kuipers, and W. P. M. van Swaaij, "Dynamic simulation of dispersed gas-liquid two-phase flow using a discrete bubble model," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 52, no. 9, pp. 1429–1458, 1997.
- [56] S. Baz-Rodríguez, A. Aguilar-Corona, and A. Soria, "Rising velocity for single bubbles in pure liquids," *Rev. Mex. Ing. Química*, vol. 11, no. 2, pp. 269–278, 2012.
- [57] MSEM, "Mazzei® Inyectores Venturi," 2016. .
- [58] A. L. Mazzei, "Mixer-injectors with twisting and straightening vanes," 1999.
- [59] E. Rusly, L. Aye, W. W. S. Charters, and A. Ooi, "CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system," *Int. J. Refrig.*, vol. 28, no. 7, pp. 1092–1101, 2005.
- [60] "ANSYS - Simulation Driven Product Development." [Online]. Available: <http://www.ansys.com/>.
- [61] L. J.F and N. H.V, *Gas Well Deliquification , Second Edition (Gulf Drilling Guides) Full Collection*, 2 edition. 2011.
- [62] R. Drive, "Mazzei Injector Company , LLC Mazzei Injector Company , LLC."

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

- [63] E. B. Wasmund and P. Eng, "Flotation technology for coarse and fine particle recovery," pp. 1–6, 2014.
- [64] Y. Zhang, "Jet nozzle arrangement for optimising gas bubble size in flotation.," US 2008/0277329 A1, 2006.
- [65] B. Scherzinger and G. Helmuth Gabl, "Process and device for separating impurities from a suspension by flotation," US 20030070992 A1, 2003.
- [66] M. Zlokarnik, "Apparatus for flotation," US4534862, 1983.
- [67] D. B. Rice and P. M. Clift, "Methods and systems for treating wastewater using ozone activated flotation," US 7481937 B2, 2014.
- [68] T. Frankiewicz and C. M. Lee, "Vertical gas induced flotation cell," US 2004/0256325 A1, 2008.
- [69] N. E. Lange, "Gas eductors and gas eductor flotation separators," 2004.
- [70] G. Lott, "Eductor apparatus with lobes for optimizing flow patterns," US 7784999 B1, 2010.
- [71] A. Samad and M. Nizamuddin, "Flow analyses inside jet pumps used for oil wells," *Int. J. Fluid Mach. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, 2013.
- [72] A. Husain, A. Sonawat, S. Mohan, and A. Samad, "Energy efficient design of a jet pump by ensemble of surrogates and evolutionary approach," *Int. J. Fluid Mach. Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 265–276, 2016.
- [73] R. Mallela and D. Chatterjee, "Numerical investigation of the effect of geometry on the performance of a jet pump," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 225, no. 7, pp. 1614–1625, 2011.
- [74] A. Mandal, "Characterization of gas-liquid parameters in a down-flow jet loop bubble column," *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 2, pp. 253–264, 2010.
- [75] S. K. Majumder, G. Kundu, and D. Mukherjee, "Mixing mechanism in a modified co-current downflow bubble column," *Chem. Eng. J.*, vol. 112, no. 1–3, pp. 45–55, 2005.
- [76] X. Long, N. Han, and Q. Chen, "Influence of nozzle exit tip thickness on the performance and flow field of jet pump," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 10, pp. 1959–1965, 2008.
- [77] F. P. Puget, M. V. Melo, and G. Massarani, "Wastewater treatment by flotation," *Brazilian J. Chem. Eng.*, vol. 17, no. 4–7, pp. 407–414, Dec. 2000.
- [78] A. Elgozali, V. Linek, M. Fialová, O. Wein, and J. Zahradník, "Influence of viscosity and surface tension on performance of gas-liquid contactors with ejector type gas distributor," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 57, no. 15, pp. 2987–2994, 2002.
- [79] P. H. M. R. Cramers, L. Smit, G. M. Leuteritz, L. L. van Dierendonck, and A.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación
por Inyección de Gas

A. C. M. Beenackers, "Hydrodynamics and local mass transfer characteristics of gas-liquid ejectors," *Chem. Eng. J. Biochem. Eng. J.*, vol. 53, no. 1, pp. 67–73, 1993.

- [80] P. H. M. R. Cramers, A. A. C. M. Beenackers, and L. L. van Dierendonck, "Hydrodynamics and mass transfer characteristics of a loop-venturi reactor with a downflow liquid jet ejector," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 47, no. 13–14, pp. 3557–3564, 1992.

ANEXO A

ESTADO DEL ARTE SOBRE EDUCTORES

En este anexo se presenta una recopilación de trabajos encontrados durante esta tesis en cuanto a patentes de eductores y en cuanto a trabajos que utilizan eductores en la formación de burbujas para procesos similares al caso de estudio.

PATENTES

Se presenta una descripción de las boquillas existentes para generación de burbujas mediante la búsqueda bibliográfica de patentes, productos comerciales y diseños. Los resultados más significativos se representan en la Tabla 16.

Tabla 16. Parámetros de funcionamiento de las boquillas.

	Tipo de boquilla	Diámetro burbuja (μm)	Densidad de burbujas	Presión de in gas (atm)	Presión in agua (atm)	Tamaño partículas (μm)	% de limpieza	Diámetro Entrada (mm)	
								gas	agua
Boquilla mazzei [62]	Venturi	200-300 μm	$0.5 - 1 \times 10^4$ burbujas / cm^3	6	1-9.999	<180		12.7	12.7
Cavtube sparged [63]		<1E-6	**	***	***	***	70-90	12.7	12.7
Unit ISF [47]		***	***	3 a 5	5.083	200 a 300	95-98	12.7	12.7
EE.UU. 200802773 29 A1 [64]		50 μm			4.935			2.8	**
US 200300709 92 A1 [65]					2.961-9.869				
US 4,534,862 [66]	Tobera						95		
[67]		140-400			2.722 a 10.887		85-99		
[68]		100-500							
[69]				1.727					

Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Las boquillas estudiadas se describen a continuación.

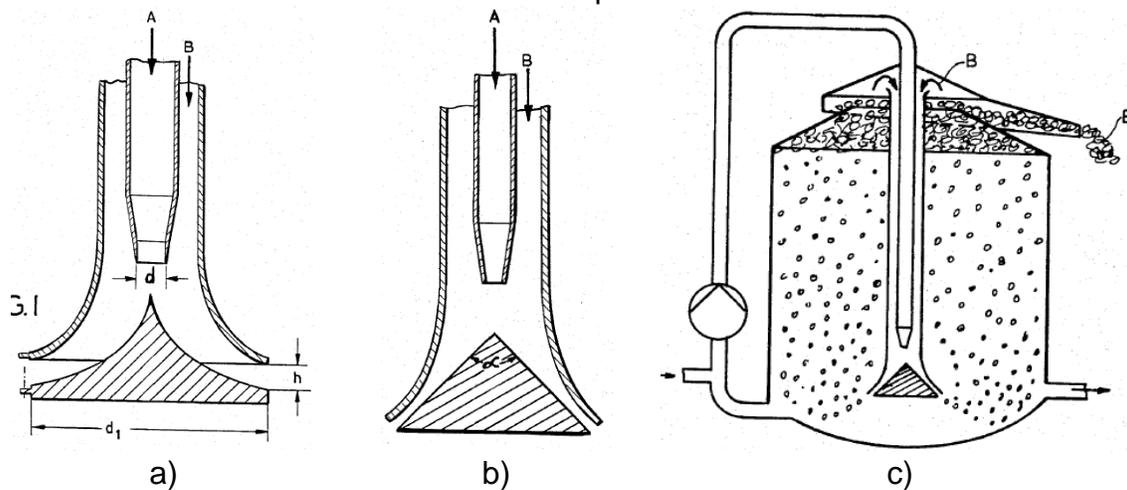
US Patent 4,534,862

Apparatus for flotation

En [66] se describe una boquilla en forma de embudo en el que un deflector cónico está ubicado en el tanque de flotación, cuyo eje está en línea con el eje del chorro de propulsión para la formación de micro burbujas (ver Figura 72). Este deflector cónico puede tener ángulos de cono en el rango de 60° a 150° de acuerdo a las necesidades de la aplicación; así mismo, la pared del cono puede ser recta como también cóncava. Estas boquillas en forma de embudo, además de provocar la formación de burbujas de gas extremadamente pequeñas, tienen el propósito de causar la menor turbulencia posible en el depósito para evitar el desprendimiento de los floculos con las microburbujas. Este dispositivo corresponde a boquillas divergentes o tipo tobera; la presencia del deflector en el eje de la tobera de propulsión a chorro, sirve para desviar y desplegar en forma de abanico la propulsión del líquido antes de que este entre al tanque de flotación, para cubrir una mayor área de distribución de las burbujas, garantizando una remoción de lodos del 95%.

Figura 72. Boquilla tipo tobera con deflector en eje de propulsión.

a). Boquilla con deflector cóncavo. b). Boquilla con deflector recto. C. Instalación de la boquilla.



Fuente: Tomado de [66].

Boquillas CavTube

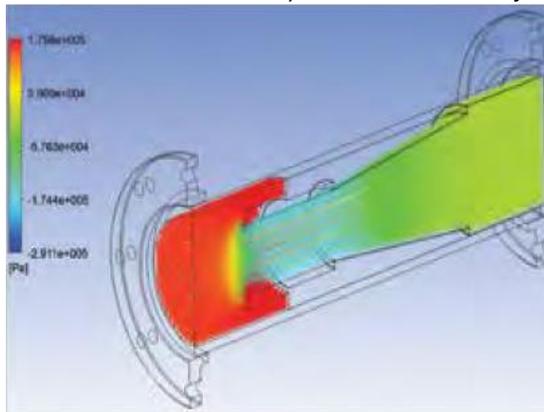
Existe boquillas diseñadas bajo el principio de cavitación hidrodinámica [63]. Este fenómeno ocurre cuando la presión del líquido en movimiento se reduce momentáneamente por debajo de su presión de vapor, creando burbujas llenas de

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

vapor ultra finas con un diámetro del orden de los pico metros. Luego, estas burbujas son transportadas por el flujo a una región de alta presión resultando en la dispersión de burbujas que se asemeja a una nube humo fino. La variación de la presión descrita se puede ver en la Figura 73. Esta boquilla permite la remoción de entre el 70 y 90 % de partículas suspendidas en las agua a tratar.

Figura 73. Boquilla CavTube.

a). Presión vs Flujo. b). Boquilla instalada.



a)



b)

Fuente: Tomado de [63].

US 7784999 B1

Eductor apparatus with lobes for optimizing flow patterns

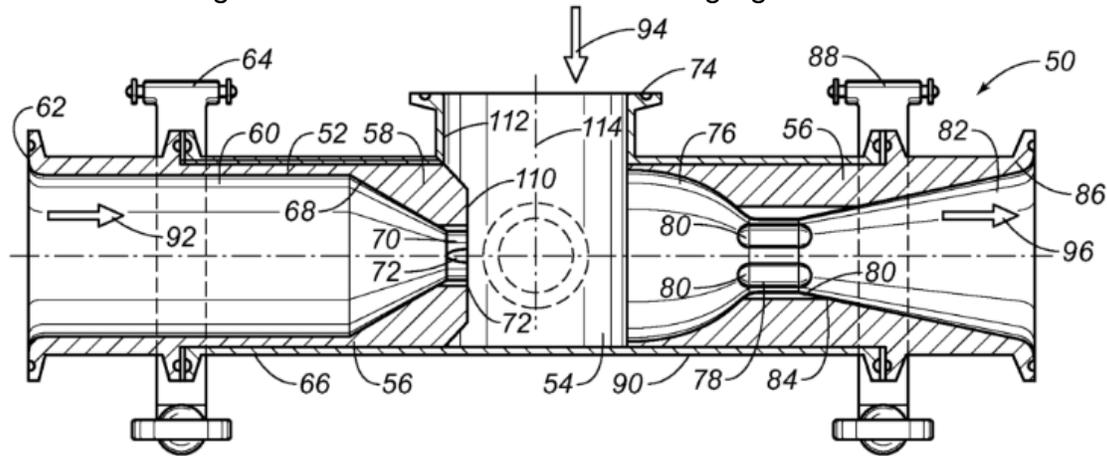
El rendimiento de este difusor se rige en gran parte por el crecimiento de la capa límite³ y el grado en que el flujo se ajusta a las paredes de la superficie interna del difusor, ver Figura 74. El diseño físico que logra una aproximación a esto dos aspectos, comprende las siguientes secciones para el eductor: Unidad principal o boquillas de entrada de material (92), una cámara de mezcla (114) conectada directamente a la entrada de succión (94) y a la reducción divergente de la unidad de entrada principal (72); finalmente una sección de difusión o garganta (50) conectada a la cámara de succión (94) y a la boquilla principal (92), esta sección presenta un arreglo de lóbulos (80) que se extienden longitudinalmente en la sección cilíndrica (78) comprendida entre la boquilla divergente (76) y convergente (82) de la garganta (50). Esta estructura brinda mejoras sustanciales para controlar la capa límite aguas abajo para asegurar un flujo laminar y retrasar el desprendimiento de las burbujas. Además, el eductor está diseñado para convertir

³ **Capa límite:** Es la zona donde el movimiento de un fluido es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. Esta puede ser laminar o turbulenta.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

el mayor porcentaje posible de la energía cinética en presión dentro de la restricción de la garganta [70].

Figura 74. Eductor con lóbulos en la garganta difusora.



Fuente: Tomado de [70].

US 7481937 B2

Methods and systems for treating wastewater using ozone activated flotation

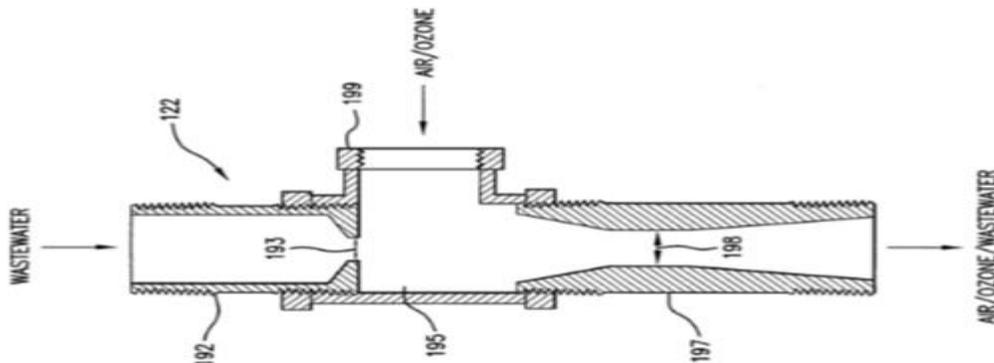
De los diversos métodos y sistemas que se plantean para el tratamiento de aguas residuales, un método de tratamiento consiste en la interacción entre el oxígeno, ya sea por métodos naturales o inducidos. La presente invención plantea la ozonificación del agua a tratar implementando una boquilla que mezcla una porción de agua residual con un porcentaje idóneo de aire/oxígeno para diluirlo en una piscina de tratamiento [67]. El presente eductor, Ver Figura 75 tiene una boquilla de inducción (122) tipo Venturi de la línea Mezzei Venturi Injectors; su funcionamiento esta descrito de la siguiente manera: El agua residual se recircula hacia la entrada de la boquilla de inducción (122), que se encarga de arrastrar una combinación de gas ozono/aire en la corriente de agua residual a tratar con una eficiencia de 70% o mayor; la sección de entrada (193) presenta una reducción o trompa de descarga; un compartimento de mezclado (195) y una válvula de aguja o tubo (197) con un orificio de tubo Venturi convencional o garganta (198). La fuerza motriz con la que transitan las aguas residuales de alta velocidad por la boquilla de inducción, crea un vacío parcial en la sección de mezclado en el que una porción de ozono/aire se introduce en la corriente de aguas residuales; luego esta corriente de agua y ozono se vuelve a comprimir en el tubo Venturi interno (197) creando una mezcla uniforme de gas/liquido en el extremo de descarga.

Estas boquillas pueden configurarse con una presión de líquido de 40 a 160 psi para generar una velocidad de arrastre aire/ozono de 10 a 20 mg/l de flujo de aguas

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

recirculadas. Proporcionan una remoción del 85 a 99% de sólidos en suspensión con burbujas de 140 a 400 μm de diámetro.

Figura 75. Boquilla de ozonificación para tratamiento de aguas residuales.



Fuente: Tomado de [67].

US 2004/0256325 A1

Vertical gas induced flotation cell:

Sistema de flotación para la separación de aceite/sólidos a partir de una mezcla de agua e hidrocarburos. El sistema incluye un recipiente vertical que tiene una entrada para introducir agua aceitosa en la sección horizontal superior [68]. El recipiente también tiene una salida de agua en una sección inferior del recipiente y una salida de aceite sedimentado.

Un eductor está posicionado en la parte inferior del recipiente para proporcionar pequeñas burbujas de gas uniformemente sobre la base; este tiene una entrada de líquido, entrada de gas y una salida de solución aireada, dispuesta para difundir pequeñas burbujas de gas en un patrón horizontal radial.

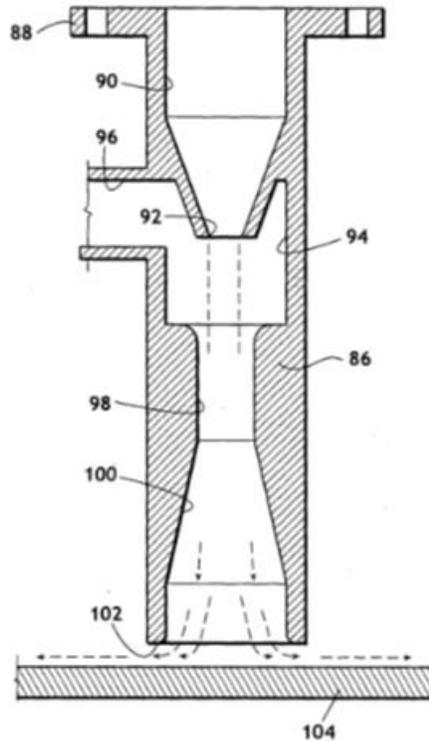
La patente en cuestión hace referencia a todo un sistema de separación por flotación, sin embargo como el objetivo de la investigación es la boquilla distribuidora se describe su estructura y funcionamiento:

En la Figura 76 se presenta el extremo izquierdo de la boquilla inicialmente cilíndrica con una brida de conexión (88) para la fijación de la tubería de entrada, la boquilla continua en una reducción divergente de diámetro inferior (92) que se comunica con una cavidad interna ampliada (94), esta a su vez comunicada con una entrada de gas (96) y también trasmite a un conducto de diámetro interior reducido (98) que a su vez se comunica con una sección de descarga en forma cónica (100) que también se mantiene cilíndricamente hasta terminar la descarga (102). La entrada de gas (96) es abastecida por la recirculación del gas acumulado en la parte superior del recipiente vertical. Mediante el arreglo de convergencias y divergencias, la

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

patente garantiza la obtención de micro burbujas de 100 a 500 micras de diámetro, siendo el tamaño ideal para la flotación de gotas de aceite.

Figura 76. Boquilla distribuidora.



Fuente: Tomado de [68].

US 2004/0094848 A1

Gas eductors and gas eductor flotation separators

La presente invención hace referencia a la utilización de eductores para la flotación mediante la inducción de gas, para la eliminación de aceite y otros contaminantes del agua. El principio de aplicación consiste en generar y agregar la burbuja directamente al recipiente contenedor de agua contaminada, para que las burbujas se adjunten a las partículas y las conduzca a la superficie. El eductor de la Figura 77b hace referencia a la mejora propuesta en la patente; sin embargo está basado en un dispositivo Venturi convencional [69].

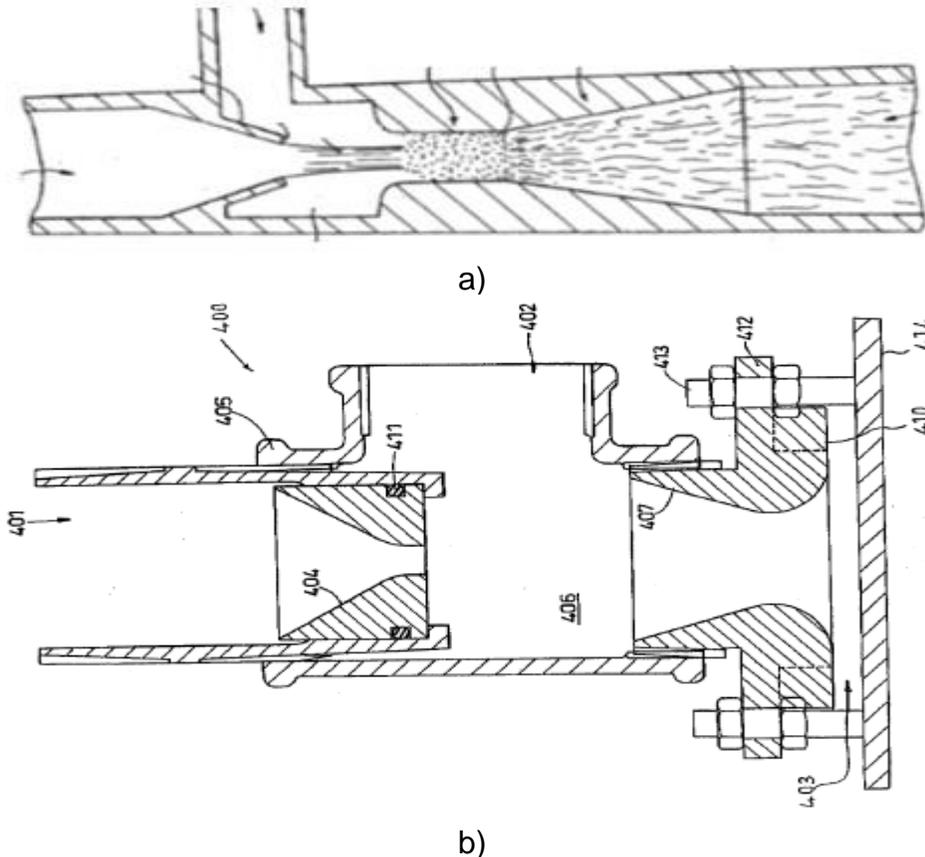
La patente plantea una descripción del diseño formulada de la siguiente manera: Un orificio de entrada (401) totalmente cilíndrico en el eje X encargado de entregar un fluido de agua; unos pernos roscados (403) los cuales sujetan una placa de impacto (414) opcional; internamente se encuentra una boquilla (404) cónica, por la que pasa el fluido de agua limpia para hacer contacto con el gas de entrada (402) en la

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

cámara de presurización (406), y posteriormente conducir la mezcla a una sección de difusión, mediante una sección de salida cónica (407) y con una terminación en forma de tobera por la que tanto gas como agua son arrastrados antes de ser expulsados del equipo hacia el recipiente contenedor del líquido a tratar. El aporte de la invención es en el diseño de la cámara (406) en amplitud y la conexión directa con el eductor (407) en el que la parte media es menor en diámetro que la entrada y que la salida, generando un desprendimiento suave de la combinación agua/gas; de modo que el sistema mejorado refleja un consumo de gas regulado a diferencia de un Venturi convencional cuando funcionan a los mismos caudales de entrada, como también la producción de burbujas más finas y al mismo tiempo una mejor distribución de ellas.

El diámetro de entrada para el flujo de agua es de 19 mm y la salida que define la difusión es de 10 mm, el largo o cuerpo total de la boquilla es de 107mm, bajo estos parámetros se observa que para un flujo de agua motriz de 20 m³/h se genera una succión de 0.4 barg en la entrada del gas y una caída de presión de 1.75 barg. Para el proceso de acoplamiento de la sección de entrada de agua, la invención presenta una sección de tubo roscado para un acople de media pulgada.

Figura 77. Eductores para inducción de gas.
a). Venturi convencional. b). Eductor de la patente.



Fuente: Tomado de [69].

TRABAJOS DONDE SE USAN EDUCTORES PARA GENERACIÓN DE BURBUJAS.

A continuación se presentan algunos trabajos encontrados que hacen uso de eyectores en generación de microburbujas.

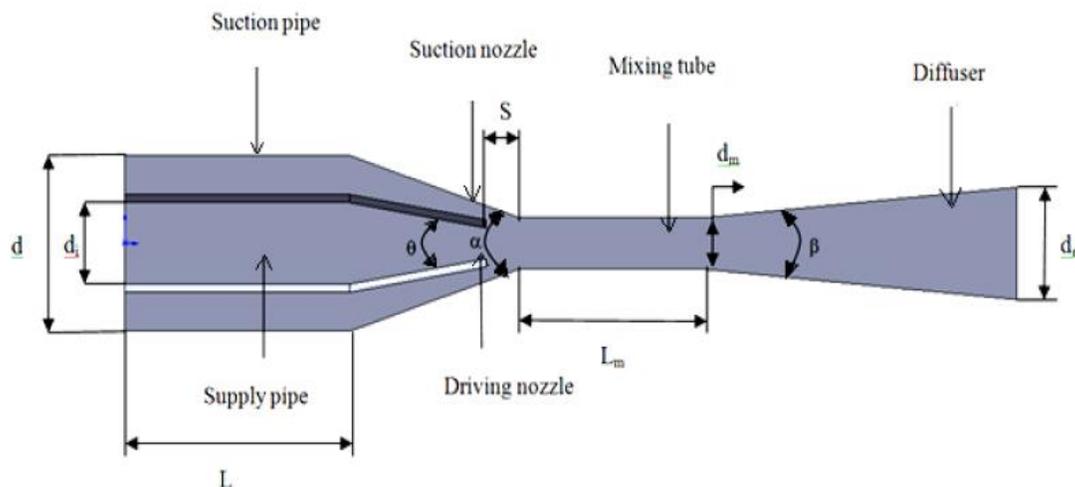
I.Flow Analysis Inside Jet Pumps Used for Oil Wells

Este estudio plantea analizar el comportamiento de una bomba de chorro utilizada en pozos petroleros, es usada para bombear agua de tal manera que se estudiar las relaciones de área y longitud del diámetro del tubo de mezcla, mostrando que el aumento de la viscosidad y densidad del fluido secundario reducía la eficiencia del sistema y que el agua como fluido primario produjo una mejor eficiencia que el aceite ligero. También se encontró que la longitud de la garganta más larga aumentó la eficiencia de trasporte de material líquido hasta el 40% [71],[72].

La Figura 78 muestra los componentes estructurales del eductor con gran similitud al expuesto por la fábrica Mazzei.

Esta bomba es adecuada para instalarse en pozos profundos, pozos direccionales, pozos o direccionales, pozos de producción submarinos, pozos con fluido de alta viscosidad, alta parafina, alto contenido de arena, y particularmente para pozos con una proporción de gasóleo relativamente alta.

Figura 78. Componentes de la bomba de chorro.



Fuente: Tomado de [71].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

La Tabla 17 identifica las secciones del eductor con sus respectivas dimensiones en milímetros

Tabla 17. Secciones del eyector bombas de chorro.

Sección	nomenclatura	Valor (mm)
Tubo de suministro	L	154
	t	5mm
	d	50
Boquilla de conducción	d_i	50
	θ	36.5 grados
	d_e	17
Distancia de retroceso	s	22
tubería de succión	L	154
	d	108
Boquilla de succión	d_i	108
	d_e	32
	α	55.6 grados
Tubo mezclador	L_m	139
	D_m	32
Difusor	d_i	32
	β	10 grados
	d_e	69
Flujo de masa Régimen de flujo subsónico	Fmasa	0.2,0.4,0.6,0.8,1
	P. reff	105 N/m ²
	T	25 grados C

Fuente: tomado de [71].

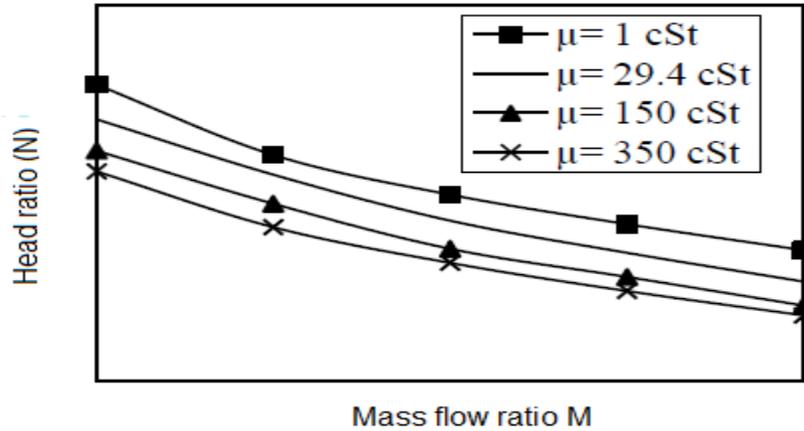
El funcionamiento está basado en el principio de Bernoulli como todos los dispositivos de esta generación, sin embargo se hace una breve descripción de su comportamiento estructural y de desempeño, referente al trabajo particular para el que fue diseñada. Consta de una sección de cámara de mezcla o de garganta, esta separa dos conos enfrentados a cada lado. Un fluido primario de alta energía se inyecta a alta presión a la boquilla de suministro y se convierte en una corriente de baja presión después de pasar a través de la boquilla. En este punto, tiene lugar la succión del fluido secundario que es básicamente un fluido reservorio. Ambos fluidos entran en la cámara de mezcla. El fluido mezclado entra en el difusor, como en esta sección el fluido presenta una alta concentración de energía cinética, esta ayuda a elevar la velocidad del fluido.

Sin embargo afirma esta investigación que los parámetros geométricos y de fluidos que afectan al rendimiento de las bombas de chorro son la longitud del tubo de mezcla, la posición de la boquilla, las dimensiones del difusor, el peso molecular del fluido, temperatura de alimentación, velocidad del fluido primario, número de Reynolds-viscosidad de ambos fluidos, relación de presión.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

A continuación se muestra en la Figura 79 cómo afecta la viscosidad (μ) en el fluido secundario el funcionamiento del eyector para un rango de 1, 29,4, 150 y 350 cSt. Se puede evidenciar que el cabezal hidráulico máximo para un fluido secundario particular se reduce a medida que aumenta la viscosidad y la densidad.

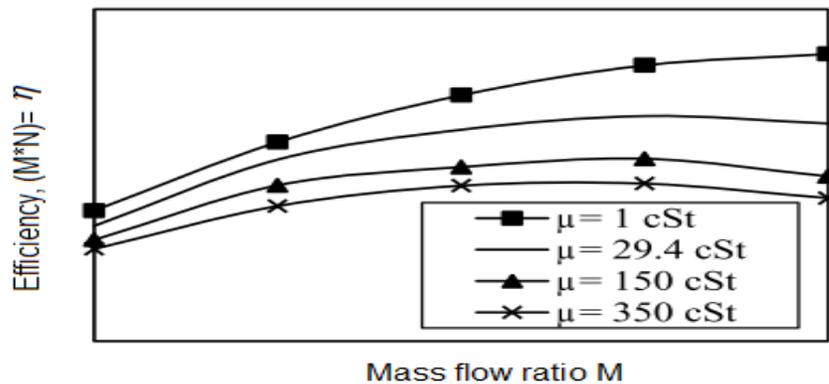
Figura 79. Variación de la relación head ratio con relación de flujo de masa a diferentes viscosidades de fluido secundario (Líquido primario: agua).



Fuente : tomado de [71].

A continuación se muestra en la Figura 80 como la eficiencia del eductor aumenta frente a la relación de masa hasta cierto punto y luego se observa que tiene una tendencia decreciente esta tendencia de la curva de eficiencia está completamente de acuerdo con las literaturas que muestran que las bombas de chorro alcanzan su máximo rendimiento cuando la relación de flujo de masa se mantiene en el intervalo de 0,2 a 1

Figura 80. Variación de la eficiencia con relación de flujo de masa a diferentes viscosidades de fluido secundario (Líquido primario: agua).

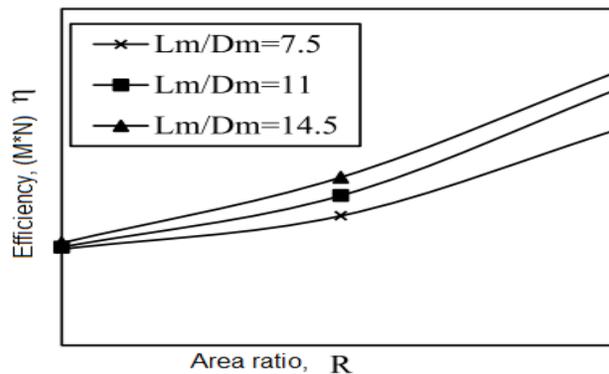


Fuente: Tomado de [71].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Por último se muestra cómo afecta la eficiencia del dispositivo respecto a la variación de la relación (L_m/D_m). Recordemos que la literatura nos indica que el objetivo del tubo mezclador es fusionar bien los fluidos primario y secundario antes de que el flujo combinado alcance la sección de difusión. Según este requerimiento el inyector de chorro funcionará bien si la longitud de la sección es 5-15 veces el diámetro del tubo mezclador[73]. Este estudio demuestra que la máxima eficiencia se obtuvo con $L_m / d_m = 14,5$ y $R = 0,65$ Figura 81. Y que la eficiencia puede aumentarse mediante un ampliación adicional de R y L_m / d_m .

Figura 81. Efecto de eficiencia respecto a la relación de área a diferentes L_m/d_m .



Fuente : tomado de [71].

II.Characterization of gas-liquid parameters in a down-flow jet loop bubble column

Este documento hace referencia al estudio del efecto de choque ocurrido en la garganta del eyector, su posible posición y cómo afecta este fenómeno el buen desempeño del eductor, además considera tratar el fenómeno como un flujo bifásico, agua como fase continua y aire como fase dispersa, mediante el enfoque Euler-Lagrange, que también se conoce como el modelo de fase discreta el cual es utilizado para evaluar regímenes de flujo donde la diferencia entre las fracciones de volumen de las dos fases es alta. El objetivo es la implementación de una ecuación de equilibrio de fuerzas mediante ecuaciones matemáticas en el marco de referencia de Lagrange para calcular el efecto que tiene la fase primaria sobre la trayectoria de cada partícula,

El artículo hace énfasis en tener precaución a la hora de evaluar estos sistemas computacionalmente, enfatizando que si no se tienen en cuenta que la fase secundaria no debe representar más del 10% del caudal volumétrico total, ya que si se sobrepasa esta proporción la ecuación de equilibrio de flujo bifásico presenta problemas con la convergencia, Incrementando la carga computacional.

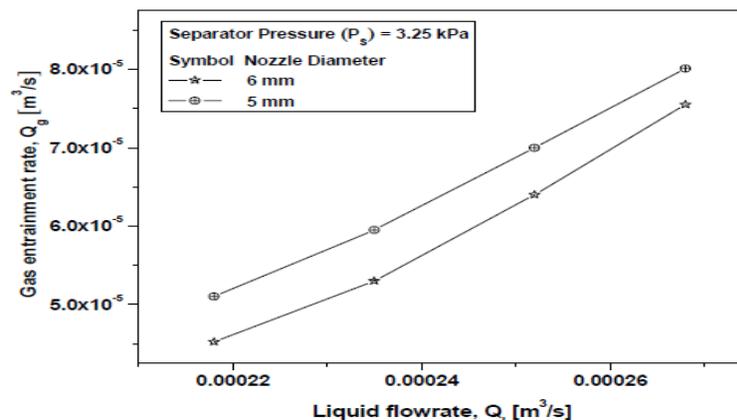
Considerada esta propiedad se enfatiza en el enfoque de Euler-Lagrange el cual se aplica principalmente para determinar los coeficientes de dispersión a partir de

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

una pequeña cantidad de gotitas, sin embargo falla en predecir el comportamiento de fenómenos físicos en un sistema con mayor retención. Por este motivo existen tres modelos Euler–Euler para abordar esta problemática el modelo VOF, el modelo mixture o de mezcla y el modelo Eulerian.

La Figura 82 muestra Los resultados para la tasa de arrastre de aire frente al caudal de líquido motriz en el eyector de líquido con diámetro de boquilla igual a 6 mm y 5 mm[74]

Figura 82. Succión de aire frente al caudal de líquido motriz con variación de diámetro de boquillas 6-5 mm.



Fuente : tomado de [74].

Puede verse que al disminuir el diámetro de la boquilla aumenta la cantidad de aire succionado, debido al aumento de la velocidad del fluido primario. Para el presente sistema, se encontró que la velocidad de arrastre mínima basada en el diámetro de la boquilla variaba entre 5 m/s y 5,5 m/s[74].

Respecto al fenómeno de choque se concluye que el rendimiento óptimo de dispersión se consigue cuando el chorro de líquido se rompe justo al final del tubo mezclador. Si la desintegración del chorro se produce antes, el flujo de la mezcla homogénea de gas líquido a través de la parte restante del dispositivo mezclador da lugar a pérdidas excesivas por fricción. Por otro lado, si el tubo mezclador es demasiado corto, el chorro no se rompe y, por consiguiente, no se produce el transporte de momento entre las fases y efectivamente para las dimensiones estructurales propuestas el fenómeno ocurre al final de la garganta y la parte superior del difusor. Por lo tanto, se puede concluir que la boquilla está situada en una posición óptima.

A continuación en la Tabla 18 se muestra el dimensionamiento estructural de las secciones del eyector estudiado en el artículo citado

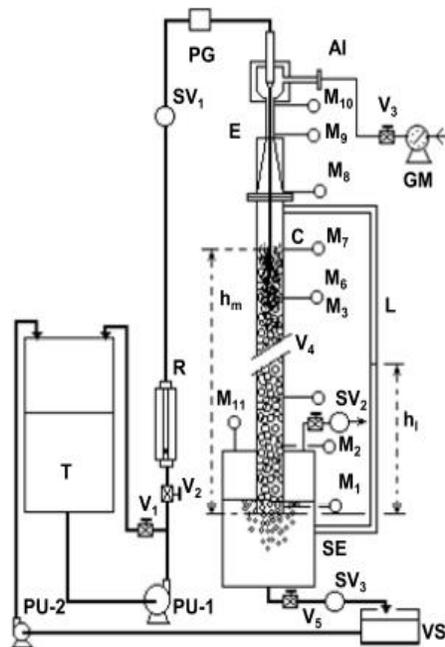
Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Tabla 18. Dimensionamiento estructural de las secciones del eyector.

Descripción	Diámetro (mm)
Altura de la cámara de succión	50
Diámetro de la cámara de succión	60
Diámetro de la garganta	19
Longitud de la garganta	183
Longitud del difusor	254
Diámetro del contactor	60
Diámetro de entrada de gas	10
Longitud del contactor	25
Diámetro de la boquilla utilizada	6 y 5

Fuente: Tomado de [74].

Figura 83. Caracterización de los parámetros gas-líquido en una columna de burbujas de bucle de chorro descendente.



Fuente : tomado de[74] [74].

III. Influence of nozzle exit tip thickness on the performance and flow field of jet pump.

Esta investigación hace referencia a la influencia (DN) que tiene la boquilla en la distribución de la energía cinética (k). La no presencia de esta hace que (k) tome valores altos pero se disipa rápidamente, sin embargo su presencia repercute en la creación de dos vórtices cercanos a la punta de salida de la boquilla, uno descendente y otro concomitante para una relación de caudal $Q=1$ y $(\delta e) = 0.8\text{mm}$,

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

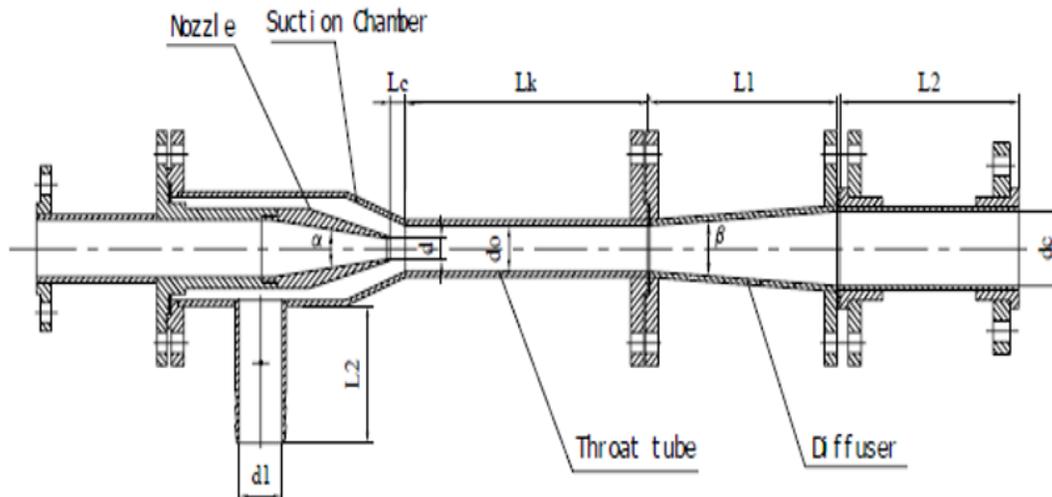
sin embargo al aumentar $Q=2$, el pequeño vórtice descendente desaparece y el vórtice concomitante se hace más grande. También puede pasar que el vórtice descendente pueda interactuar con el posible flujo de retorno que se forma en el tubo de garganta y partes de la cámara de succión.

También concluye el artículo que Cuando $(\delta e) = 0,2 \sim 0,6$ mm, la bomba de chorro posee un mejor rendimiento sin embargo en la mayoría de los casos, es razonable ignorar el grosor de la punta de salida de la boquilla en la predicción de rendimiento con el propósito de simplicidad[76].

Respecto al diseño de la boquilla, la sección transversal de salida en eductor convencional es redonda y el espesor de la punta de salida de la boquilla se determina empíricamente intentando sea tan delgada como fuera posible, Sin embargo se encontró poco trabajo para determinar cuantitativamente cómo δe debe ser elegido, esto significa que δe se toma como cero tanto en el trabajo teórico como en el simulador. Por ende le presente trabajo se llevaron a cabo con el fin de determinar la influencia del grosor de la punta de salida de la boquilla en el rendimiento del sistema generador.

La figura la Figura 84 muestra la estructura del eductor estudiado en el artículo citado, en la cual es posible identificar el seccionamiento estructural de sus componentes más relevantes, como el objetivo es estudiar el efecto de la boquilla en la Figura 85 se evidencia el plano de esta con sus respectivas dimensiones.

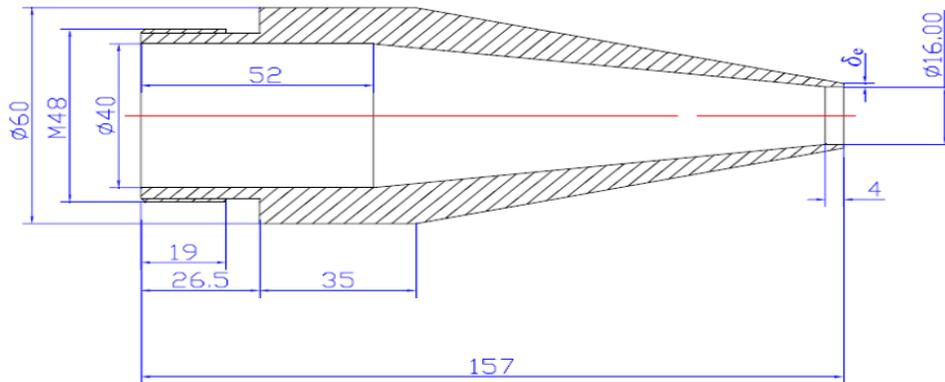
Figura 84. Estructura del eductor.



Fuente: Tomado de [76].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Figura 85. Plano y dimensionamiento estructural de la boquilla.



Fuente: tomado de [76].

Tabla 19. Dimensiones del dispositivo estudiado.

Descripción	Nomenclatura	Dimensión (mm)
diámetro de salida de la boquilla	δe	0,- 0,2,- 0,4, 0,6,- 0,8 y 1,0
diámetro de la boquilla	d	16
diámetro del tubo de la garganta	D0	40.08
diámetro de salida del difusor	Dc	80
separación del tubo de tobera a garganta	Lc	20
longitud del tubo de la garganta	Lk	280
longitud del difusor	L1	200
	L2	300
ángulo convergente de la tobera	A	13.5 grados
ángulo de difusión del difusor	B	11.5 grados
Coeficientes del modelo de turbulencia	$c\mu$	0.09
	$k\sigma$	1
	$\epsilon\sigma$	1.3
	$C\epsilon 1$	1.44
	$C\epsilon 2$	1.92
velocidad de flujo primaria		2,996 m / s
velocidades de flujo secundario		0,109 m / s a 2,18 m / s

Fuente: Modificado de [76].

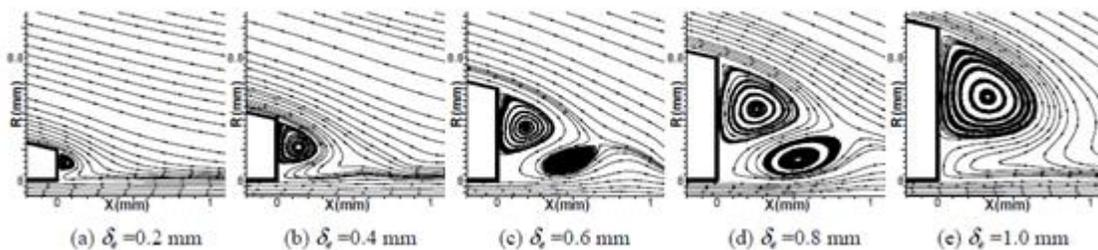
Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Como el objetivo es determinar la influencia de δ_e en la eficiencia del inyector esta presenta variaciones de diámetro, mientras que el cuerpo de la bomba y otras dimensiones de la boquilla se mantiene invariantes.

La evaluación se ejecuta teniendo en cuenta la relación de área $m = (d_o/d)^2$, relación de presión Q_s/Q_p , Caudal volumétrico del flujo arrastrado / caudal volumétrico del chorro primario y la eficiencia $\eta = hq/1-h$.

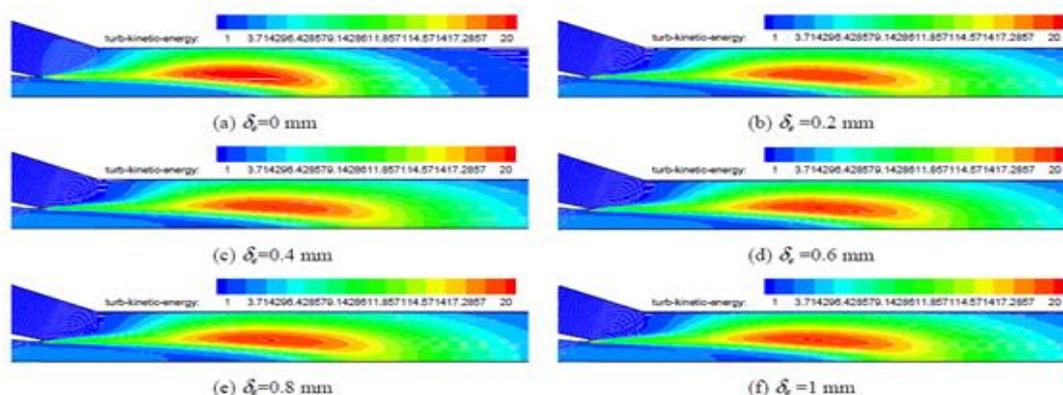
Finalmente se logra observar a partir de las Figura 86 y Figura 87 que el rendimiento tanto de la relación de presión h como de la eficiencia η de la bomba de chorro al mismo caudal varió un poco con el cambio de δ_e . También se evidencia que δ_e afecta en gran medida el desarrollo del vórtice cerca de la punta de la boquilla, la distribución de la energía cinética de la turbulencia y el retroceso. Aunque δ_e altera el campo de flujo dentro del tubo de la garganta, sólo ejerce una pequeña influencia sobre el rendimiento de la bomba de chorro. Cuando $\delta_e = 0,2-0,6$ mm, la bomba de chorro posee un mejor rendimiento.

Figura 86. Distribución del campo de flujo alrededor de la salida de la boquilla, $q=2$.



Fuente: Tomado de [76]

Figura 87: Distribución de k con diferentes δ_e , $q = 0.1$.



Fuente: tomado de [76].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

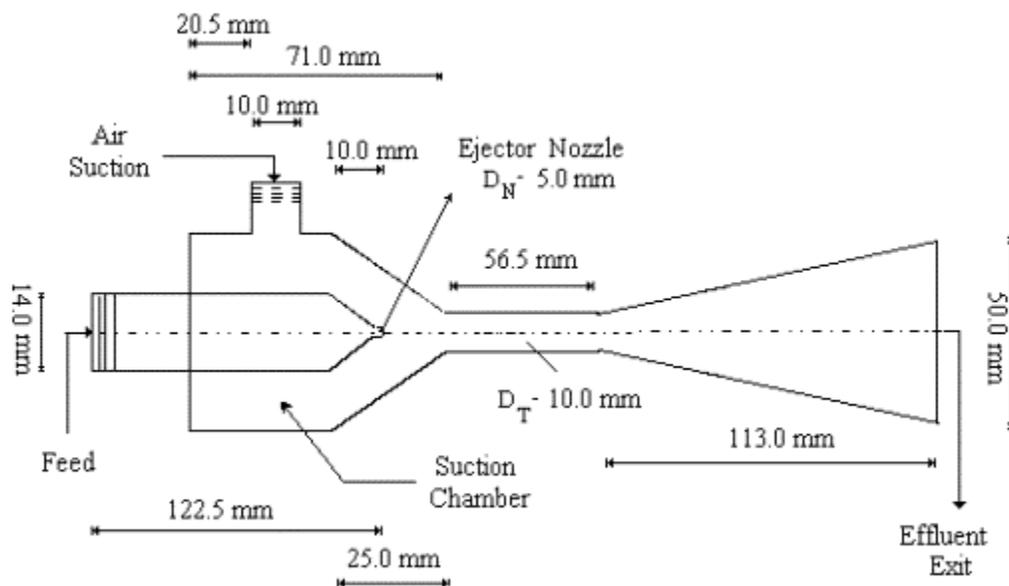
Sin embargo es razonable que la mayoría de investigadores desprecien este parámetro puesto que solo se logra una mejora del 1.3%[76].

IV.Wastewater treatment by flotation

Este trabajo aborda el análisis del rendimiento de un aparato de separación experimental para la flotación de aguas residuales líquidas mediante la generación de burbujas por un eyector de gas-líquido, siendo el líquido el flujo de alimentación primario que ingresa a través de la boquilla, la cual debe tener un diámetro de salida (DN) mucho más pequeño, generando un chorro de líquido con máxima velocidad en la sección recta del difusor, con diámetro DT, en donde la presión del líquido es menor que en la entrada; Por lo tanto, la formación de microburbujas de aire disuelto tiene lugar en la sección recta del difusor. Por otra parte, el vacío creado por el chorro del fluido a alta velocidad promueve la succión de aire a través de la cámara de aspiración, lo que implica en la formación de burbujas más grandes que las burbujas formadas a partir del aire disuelto en el efluente.

El autor basado en el estado del arte de su investigación propone que el diámetro medio de las burbujas es una función de la relación DN/DT y la velocidad de salida del fluido del eyector, por lo tanto propone los rangos de diseño para el eductor entre $0.21 \leq \frac{D_N}{D_T} \leq 1.0$ y $0.1 \leq \frac{Q_{aire}}{Q_L} \leq 1.0$ como se refleja en la Figura 88

Figura 88. Dimensiones y la configuración del equipo.



Fuente: tomado de [77].

El fluido de alimentación motriz es leche en polvo disuelta en agua con una concentración de 0.1% W/V mostrados en la Tabla 20.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

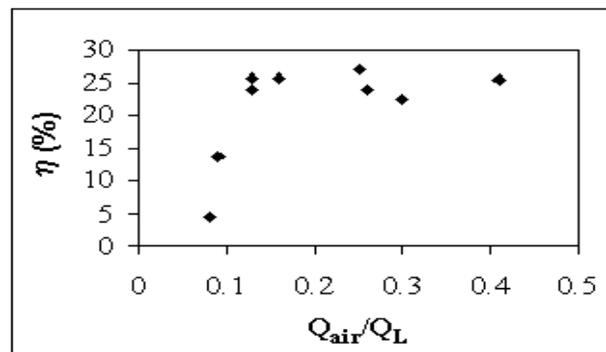
Tabla 20. Especificaciones de la leche en polvo la serenissima (mastellone Hnos S.A argentina).

Average composition per 100 grams	
Fat	26.0%
Protein	25.0%
Lactose	36.0%
Ash	7.0%
Humidity	3.5%

Fuente: tomado de [77].

La Figura 89 muestra la eficiencia o rendimiento del dispositivo Venturi anexo a una columna de flotación de laboratorio relacionado con el caudal de aire succionado sobre el caudal de alimentación Q_{aire} / Q_L .

Figura 89. Influencia de la relación Q_{aire} / Q_L .



Fuente: tomado de [77].

Se observa que para relaciones de $Q_{\text{aire}}/Q_L < 0,15$ hay una caída de la eficiencia de separación. La caída en la eficiencia es probable que se presente tanto por una velocidad de flujo de aire insuficiente para la flotación o por una alta velocidad de flujo de alimentación.

V. Influence of viscosity and surface tension on performance of gas-liquid contactors with ejector type gas distributor.

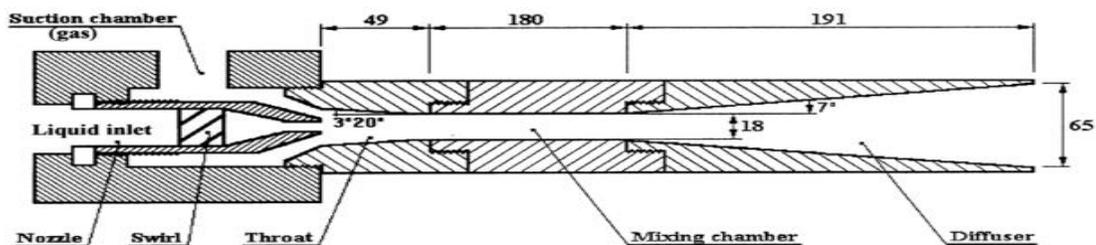
En este artículo los autores plantean el estudio del efecto de la viscosidad en fase líquida (0,7-25 mPa s) y de la tensión superficial (33-65 mN m⁻¹) sobre las características hidráulicas y de transferencia de masa en una columna de burbujeo con un distribuidor de gas de tipo eyector ascendente como también la transferencia de masa referente al estado de equilibrio del aire y su absorción física, cabe resaltar que en esta investigación se usaron aditivos tales como espesante polimérico,

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

sacarosa y un disolvente de espuma alcohólica; estas composiciones arrojaran resultados fuera del campo de la presente investigación sin embargo como el objetivo central es la parte estructural y los factores relacionados con la mecánica de fluidos que puedan ocurrir dentro del generador, el artículo aporta información significativa a la investigación. Sin embargo los autores encuentran en su investigación que La retención de gas en la columna de burbujas aumentó con el aumento de la viscosidad y la tensión superficial mientras que el coeficiente de transferencia de masa en el eyector disminuyó con el aumento de la viscosidad[78]. Los investigadores dejan como manifiesto que en el campo científico se ha prestado poca atención al efecto de las propiedades físicas de la fase líquida sobre los parámetros de diseño del eyector, a su juicio, no hay documentación literaria en la que se estudió la influencia de las propiedades de la fase líquida sobre las características de transferencia de masa del eyector, por ende en muchas investigaciones se aborda el estudio del comportamiento del sistema de flotación en dos zonas por separado, es decir, en el eyector y en la columna de burbujeo, sin embargo estas investigaciones se han basado comúnmente en los valores integrales de la masa volumétrica, coeficiente de Transferencia de energía (kLa), transferencia de masa interfacial, mostrando valores sustancialmente diferentes. Basados en este argumento los autores proponen estudiar el efecto de la viscosidad en fase líquida y de la tensión superficial relacionadas con las características hidráulicas, es decir, la velocidad de succión del gas, el retención de gas y el coeficiente de transferencia de masa volumétrico del lado del líquido, Utilizando las dos configuraciones de eyector y algunos lotes de líquido Newtoniano seleccionados.

A continuación Figura. 90 muestra la estructura del eyector estudiado por los autores, ellos usan una configuración particular, pues la sección de difusión presenta ensanchamiento de la estructura, sin embargo lo más relevante es que evalúan el comportamiento del eyector en dos configuraciones, la primera se plantea con un cuerpo (swirl) dentro de la boquilla[79], encargado de generar un remolino que le dará dirección al chorro generado, y por ende variara el intercambio energético manifestando un cambio en la succión del segundo fluido.

Figura. 90. Eyector conjunto con cuerpo de remolino (swirl).



Fuente: tomado de [78].

La investigación citada hace referencia que el cuerpo (swirl) efectivamente transforma la fase líquida una vez sale de la boquilla, esto da como resultado una

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

estabilización del chorro de los dos fluidos dentro de la zona de mezcla y, por lo tanto, mejora la velocidad máxima de succión de gas[80]

Por otra parte, es evidente que el eyector necesita cierta energía cinética mínima de la fase líquida para asegurar una capacidad de succión eficaz. Es comprensible por la ecuación de Bernoulli que esta energía cinética mínima es necesaria para superar la cabeza hidrostática ejercida por el líquido en la columna[79].

Y por último se demuestra el efecto negativo del aumento de la viscosidad del líquido en el coeficiente de transferencia de masa del lado del líquido volumétrico en el eyector. Esto puede atribuirse a una disminución en la intensidad de la turbulencia, con el correspondiente aumento en un tamaño medio de las burbujas primarias. Las tasas de succión de gas fueron mejoradas por un cuerpo de remolino dentro la boquilla del eyector. El eyector con cuerpo de remolino dio una velocidad de succión hasta dos veces mayor que el eyector sin cuerpo de remolino a las mismas velocidades de líquido.

VI. Investigation on hydrodynamics and mass transfer characteristics of a gas-liquid ejector using three-dimensional CFD modeling.

El presente artículo hace referencia al estudio de un sistema de inyección bifásico gas-líquido para identificar la influencia de las condiciones de funcionamiento y geometrías del eyector sobre las características hidrodinámicas y de transferencia de masa de las dos sustancias agua/ gas, para tal propósito los autores plantean variar las condiciones de funcionamiento modificando la proporción de caudal de entrada en el intervalo de 0,2 a 1,2 como también la relación de longitud a diámetro del tubo de mezcla (LM / DM) de 4 a 10. Demostrando que con una proporción (LM / DM = 5,5), el coeficiente de transferencia de masa volumétrica aumenta con respecto al caudal de gas. Mientras tanto, en LM / DM = 4, la gráfica del coeficiente de transferencia de masa volumétrica a la relación de caudal de gas-líquido alcanza el máximo a razón de flujo de gas-líquido de 0,6. Este estudio también muestra que el coeficiente de transferencia de masa volumétrica disminuye con el aumento de la longitud del tubo mezclador[1]. Las dimensiones del inyector Venturi utilizadas se muestran en la Tabla 21.

En esta investigación, se desarrollaron cinco modelos diferentes de eyector para investigar la influencia de la longitud del tubo de mezcla en las características de transferencia de masa. Estos modelos tienen variación en la longitud del tubo mezclador de 88, 120, 150, 176 y 220 mm.

Con estas variaciones los autores pueden comprobar en laboratorios de prueba que la proporción de flujo de gas-líquido está influyendo en el desprendimiento del chorro y en la de la zona de choque en el tubo mezclador. La ubicación de la zona de mezcla se desplaza desde la entrada de la región mezcladora a QG/QL inferior hacia la salida del eyector a QG/QL superior. Y que la velocidad máxima de

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

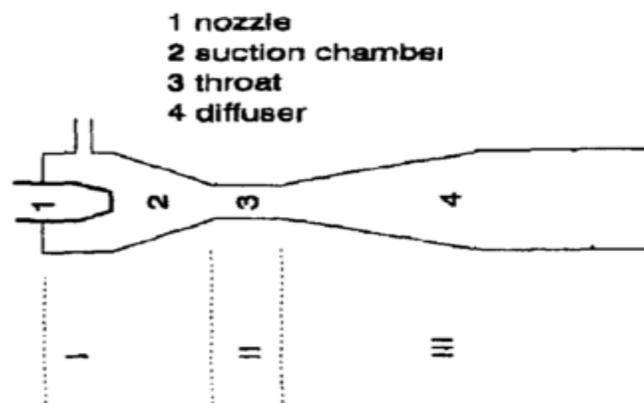
disipación de energía se alcanza en $QG/QL=0,2$, mientras que promedio de la tasa de disipación a lo largo del tubo mezclador disminuye al contrario del aumento de QG/QL .

Tabla 21. Tabla de parámetros Venturi.

		mm
diámetro de la boquilla		8.5
diámetro del tubo de mezcla	DM	22
diámetro de salida del difusor		40
ángulo del difusor		3.5
longitud del tubo de aspiración	L	100
longitudes del tubo mezclador	LM	88-120-150-176 y220
Velocidad de entrada del agua		4 m ³ / h
Velocidad de entrada del aire		1.2±0.2
intensidad de la turbulencia		3.5%
propiedades termo físicas agua y el aire		293 K y 300 K

Fuente: modificada de [1].

Figura 91. Esquema geometrico del eductor estudiado , variaiones de la region 3.



Fuente: modificada de [40].

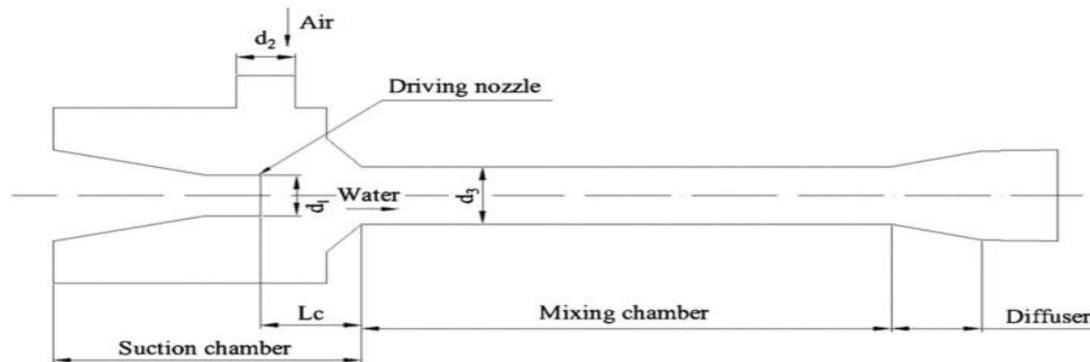
VII. Gas-liquid numerical simulation on micro-bubble generator and optimization on the nozzle-to-throat spacing

En este trabajo, los autores estudian el rendimiento del eyecto como generador de microburbujas, haciendo relevancia en la modificación de la distancia entre el diámetro de salida de la boquilla y la entrada del tubo de mezclador, en la Figura 92

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

se puede identificar la sección (l_c) la cual es directamente proporcional a la relación D_n/L_c .

Figura 92. Relación de espaciamento boquilla a garganta.



Fuente: Tomado de [4].

Sin embargo con estas variaciones se pretende simultáneamente evaluar fenómenos como caudal volumétrico de aire succionado, el diámetro de las burbujas y la posible tendencia de distribución de estas una vez salen del tubo eyector. Los resultados demuestran que el rendimiento del generador de burbujas es óptimo cuando la separación adimensional de la boquilla a la garganta es superior a 1,25 2,5 mientras que el caudal de volumen de agua se fija a 50 m³/h. En este intervalo, se obtuvo el mayor caudal de succión de aire, el diámetro de burbuja alrededor de 70 μ m y el índice de uniformidad de distribución de burbujas más alto.

Tabla 22. Dimensiones del eductor propuesto por Lijun Wang y Yan Jia.

		mm
diámetro de boquilla de accionamiento	D1	32
diámetro de entrada de aire	D2	40
diámetro de garganta	D3	46
Espaciamento boquilla a garganta	l_c	0-96
Separación adimensional de la boquilla a la garganta	$L_d = L_c / d_1$	0-3
caudal volumétrico	Q_v	
fracción de volumen	ag	
Velocidad del agua	v	18 m/s
Caudal de agua		50m ³ /h
presión estática	p_s	
Presión total	p_t	
Tensión superficial		0.0728 n/m

Fuente: Tomado de [4].

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

La variación del caudal volumétrico de aire con diferentes muestra que a medida que aumenta el L_d , el caudal de succión de aire aumenta cuando $L_d \leq 1,25$, y este valor alcanza un máximo y se mantiene estable cuando $1,25 < L_d \leq 2,5$ y luego disminuye cuando $L_d > 2,5$. La presión negativa en la entrada de aire, que finalmente influyó en el caudal volumétrico de succión, es de -85,7, -185,7 y -171,4 Pa cuando el L_d es igual a 0, 1,5 y 3. Además la pérdida de choque puede ocurrir cuando L_d es demasiado grande.

Por ultimo concluyen que el arrastre del chorro de agua fue afectado significativamente por el espaciado de la boquilla a la garganta puesto que en relación de área la cámara de succión de $L_d = 2$ es mayor que la de $L_d = 0,75$. Es decir, la cámara de succión pequeña de $L_d = 0,75$ restringe el desarrollo de la capa límite o el efecto de arrastre, dando como resultado la mala mezcla de aire y agua.

Comparación geométrica y de desempeño de los eductores estudiados.

El propósito de realizar una comparación de los eductores estudiados, incluido el usado por la patente ecoflot es tener una perspectiva de sus dimensionamiento estructural y sus diferencias entre los modelos existentes, pues ya se ha podido visualizar que de su estructura depende su desempeño, sin embargo existe en la literatura variedad de diseños y cada diseño ha sido elaborado para casos particulares, es aquí en donde se crea la necesidad de evaluar también los parámetros referentes a la composición de los fluidos que se van a tratar, pues los eyectores tienen un amplio campo de aplicación y debido a esto es que se encuentra variedad de modelos. A pesar de su gran utilidad no existen parámetros puntuales que indiquen que un diseño particular va a tener un desempeño idóneo para la tarea que se pretenda suplir, y es posible que el modelo empírico que se consulte no de resultados esperados, entonces se plantea hacer una comparación de los eductores estudiados en la sección 4.2 de los que se encuentra mayor información referente a dimensiones y dejar de lado las patentes citadas en la sección 1.4, pues la información que en ellas se expone es más referente al desempeño y no hace énfasis en sus dimensiones lo que ha sido de gran dificultad para abordar esta investigación.

A continuación en la Tabla **23** se hace una comparación de las diferentes secciones de los eyectores con el propósito de evaluar dimensiones cercanas a las usadas por ecoflot, Mazzei modelo 484x y que también hayan sido usados con el propósito de tratar fluidos de la misma índole.

Para poder colocar todos los datos en una sola tabla hacemos de cuenta que para los diseños similares a los de Mazzei el tubo de suministro cumpla con las características de la boquilla de alimentación, pues su modelo es prácticamente el mismo solo que a menor escala, claro está solo es para hacer la comparación de dimensiones.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Tabla 23. Comparación estructural de los diferentes eyectores consultados.

Sección	Elemento	nomenciatura	Mazzei	I	II	III	IV	V	VI	VII
Suministro convencional	Longitud tubo de suministro			154						
	diámetro tubo de suministro	D_i		50						
	Angulo divergente			36						
		t		5						
	Longitud Aletas torsión		24.13							
Boquilla N	Diámetro de la boquilla	D_N			5	0.8	5		8.5	3.2
	Grado aletas torsión		20							
	Diámetro de entrada de fluido motriz	D_{inN}	39.37	50		16	14			
	Distancia entre la tobera y el comienzo de la garganta	L_{TN}				20	25.5			3
	ángulo de paso/inclinación	$2D_N$				13.5				
cámara	Diámetro de entrada de gas	D_{inG}			10		10			40
	Altura				50					
	área de succión	A_s								
	Ángulo de convergencia	θ_{con}								
	Diámetro de la cámara de succión	D_s			60					
	Área de la cámara de succión	DS2-DN2/DN2								
	Ancho unión garganta succión		3.55							

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación
por Inyección de Gas

	Longitud de la cámara de succión	L_s					71			
Garganta	Diámetro de la garganta / tubo de mezcla	D_M	19	32	19	40	10		22	46
	Longitud Aletas enderezamiento		77.4							
	Grado de aletas		15							
	Longitud de la garganta	L_M	27.6	13	18	280	56.5	22	88	
	Long sección de inyección		16.6							
	Diámetro inyección		20.0							
Difusor	Ángulo de divergencia del difusor cónico	θ_{div}		10		11.5			3.5	
	Diámetro de la salida del difusor	DC		32		80	50	65	40	
	Longitud del difusor cónico	Ld			25	200	113	19	1	
Aspersión	Diámetro de aspersión	DC	39.3	69	60					
	Longitud de aspersión	LC			25				100	0
	Int agua	QG				3			4	18
	Int gas/aire	QL				1			1.2	

Fuente: Propia.

Se puede evidenciar que los datos suministrados por cada uno de los autores consultados presenta datos totalmente distintos, y además se refleja que se pasan por alto en algunos prototipos datos que se citan como puntuales al elaborar un eyector, sin embargo la información recolectada brinda un panorama más claro a la hora de elaborar o estudiar este tipo de dispositivos.

Realizando un balance comparativo entre los distintos dispositivos, llama la atención que algunos llevan en su interior restricciones que según sus autores presentarían comportamientos particulares reflejados en eficiencia, sin embargo la literatura hace hincapié en que el modelo cámara de succión, boquilla, tubo de mezcla, difusión y contactor es el diseño más usado, en contraparte la patente ecoflot usa modelo que llamaremos en esta investigación convencional, no presente un área considerable

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación
por Inyección de Gas

en la cámara de succión, pero todos los autores hacen referencia en sus prototipos la sección de mezcla, entonces es un parámetro a tener en cuenta como crucial para un posible prototipo.

ANEXO B

CONFIGURACIÓN E INSTALACIÓN DE ANSYS

Es pertinente agregar que el software ANSYS tiene un peso computacional bastante amplio, por lo que se aconseja el uso de un ordenador con buenas características de procesamiento de imagen, y un sistema de refrigeración eficiente o en su defecto utilizar un equipo de escritorio.

A continuación se presentan una serie de imágenes con las cuales se pretende mostrar los pasos más relevantes para la instalación de esta herramienta, seguidamente se muestra la configuración del solver FLUENT, el cual hace parte de una gama de instrumentos software que presenta ANSYS, para resolver los diferentes problemas tanto de termodinámica, estructuras, fluidos y electrónica.

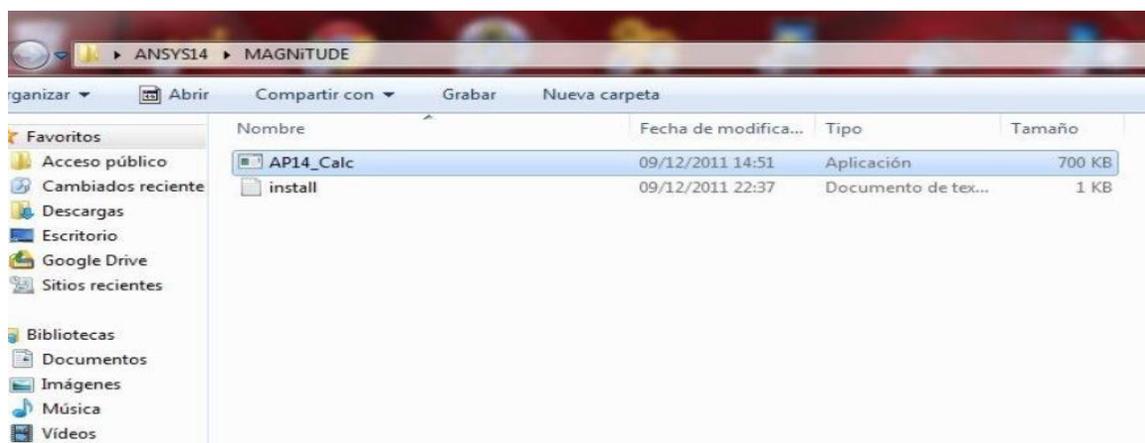
Por último se muestra una ampliación para la configuración del paquete Population Balance Model (PBM). El cual aplica un equilibrio de la población en diferentes ámbitos tales como: Cristalización, columnas de burbujas, burbujeo de gas, aerosoles, polimerización en lecho fluidizado, granulación, emulsión líquido-líquido y la separación.

Instalación de ANSYS 14.0

Para empezar la instalación de ansys 14.0 es necesario desactivar el antivirus, seguidamente usar un software para abrir archivos con formato iso.

Se continúa generando la licencia, para lo cual es pertinente dirigirse dentro de la carpeta **ANSYS14.0** ubicando la carpeta **MAGNiTUDE** y ejecutar el archivo AP14_Calc, ver Figura 93.

Figura 93. Generación de licencia.



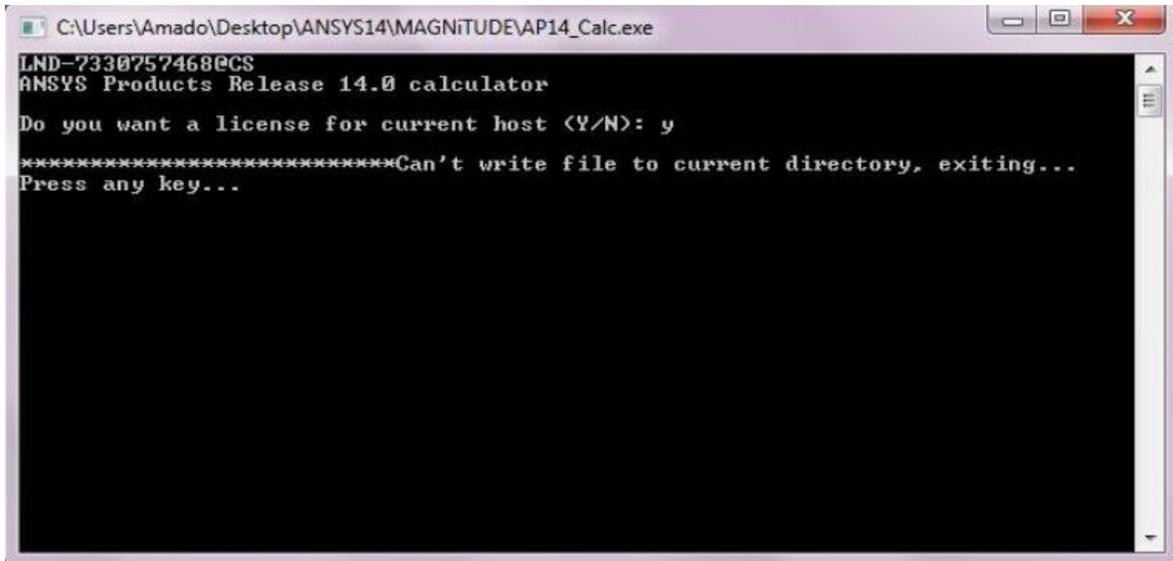
Fuente: Sustraída de ANSYS.

Una vez ejecutado este archivo se muestra en pantalla la Figura 94, se presiona la letra (Y) para empezar a generar la licencia; Para salir de esta ventana se presiona

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

cualquier letra de tal manera que se crea el archivo de texto license, el cual se utiliza más adelante en la instalación.

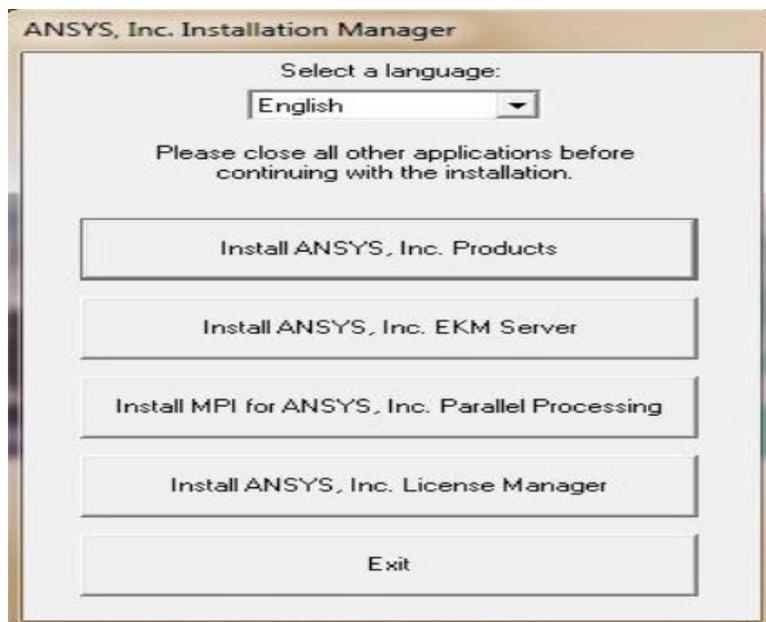
Figura 94. Archivo AP14_Calc.



Fuente: Sustraída de ANSYS.

Luego de generar el archivo de texto para la licencia se ejecuta el archivo Setup, localizado en la carpeta ANSYS14.0, dando clic derecho sobre él y ejecutando como administrador, para que se muestre en pantalla el siguiente menú de instalación, ver Figura 95.

Figura 95. Setup de instalación ANSYS14.0.

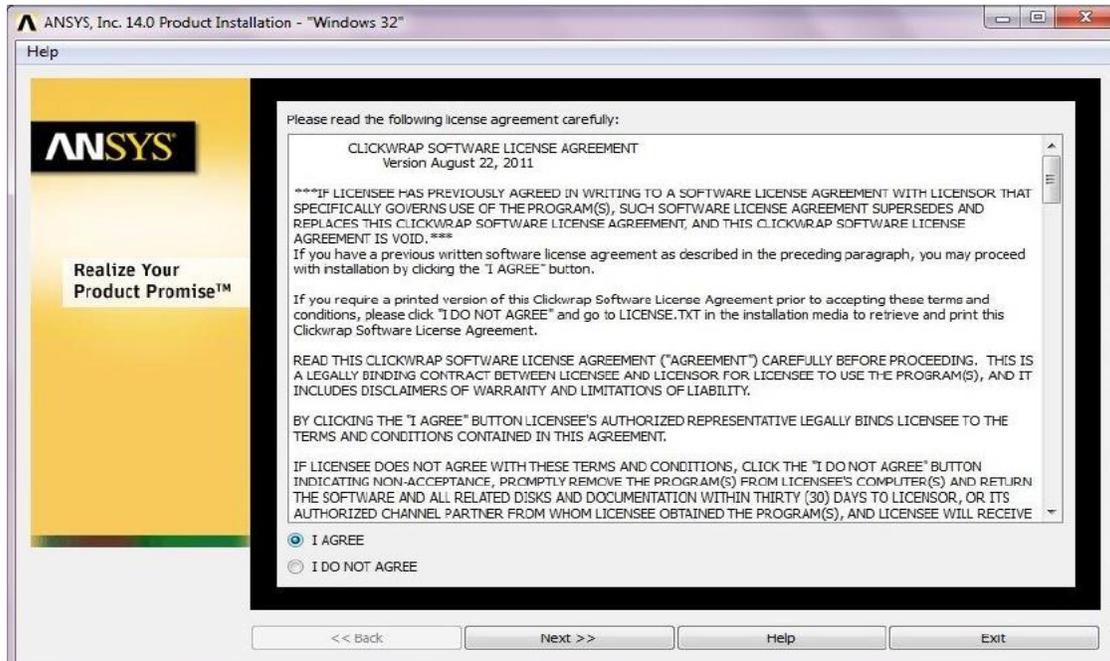


Fuente: Sustraída de ANSYS.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

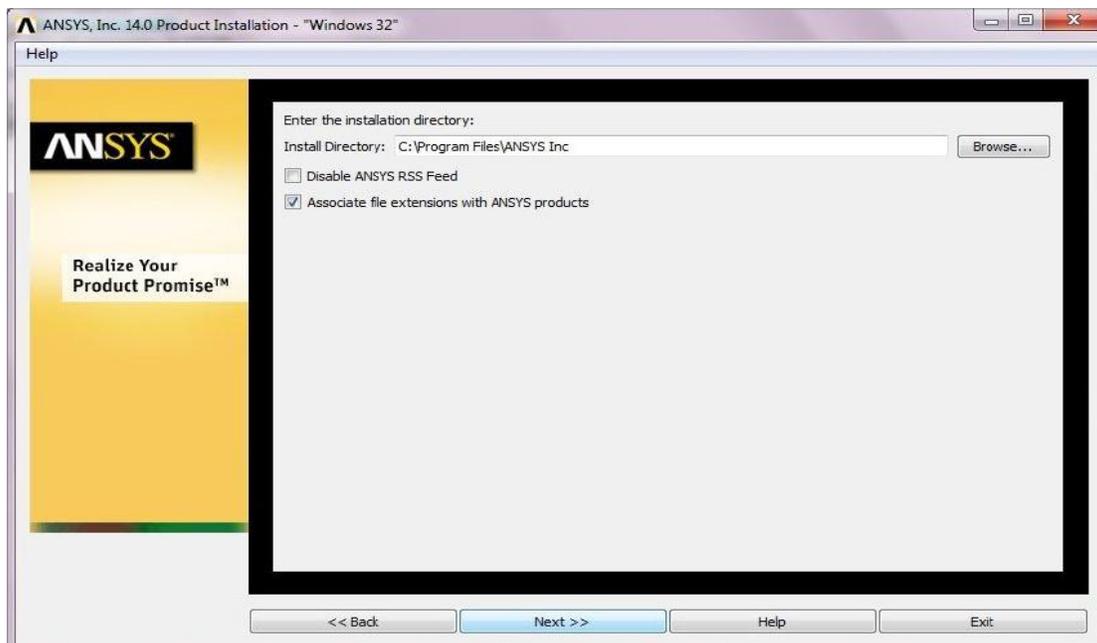
Se ejecuta Install ANSYS, Inc. Products, se aceptan los términos y condiciones, para continuar con el proceso de instalación, ver Figura 96 y Figura 97.

Figura 96. Términos y condiciones ANSYS14.0.



Fuente: Sustraída de ANSYS.

Figura 97. Directorio de instalación ANSYS14.0.

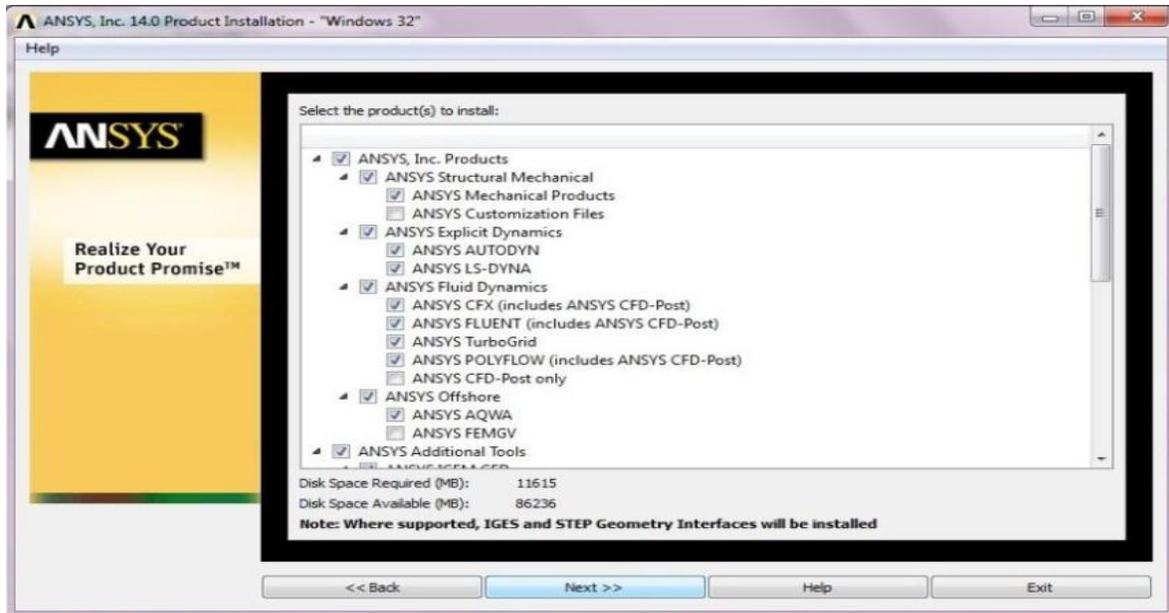


Fuente: Sustraída de ANSYS.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Posteriormente se seleccionan los solvers que se van a utilizar o se dejan por defecto como señala la siguiente imagen, ver Figura 98.

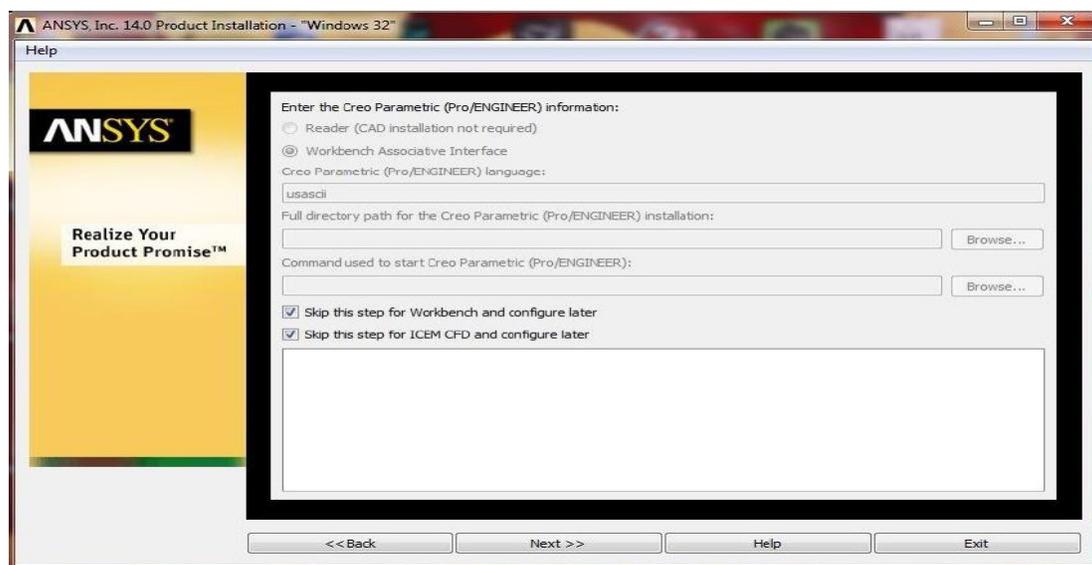
Figura 98. Selección de herramientas a instalar ANSYS14.0.



Fuente: Sustraída de ANSYS.

En la Figura 99 y Figura 100 se seleccionan las casilla que dicen **Skip this step for Workbench and configure later** y **Skip this for step for ICEM CFD and configure later** y se da clic en **Next**.

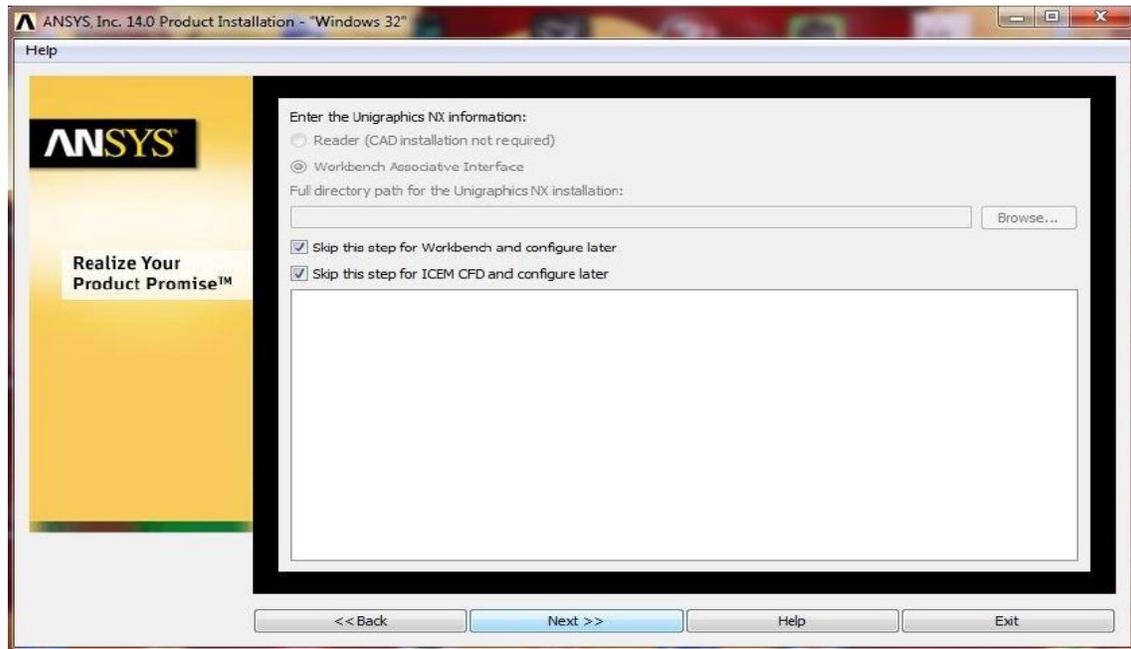
Figura 99. Configuraciones futuras de ANSYS14.0.



Fuente: Sustraída de ANSYS.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

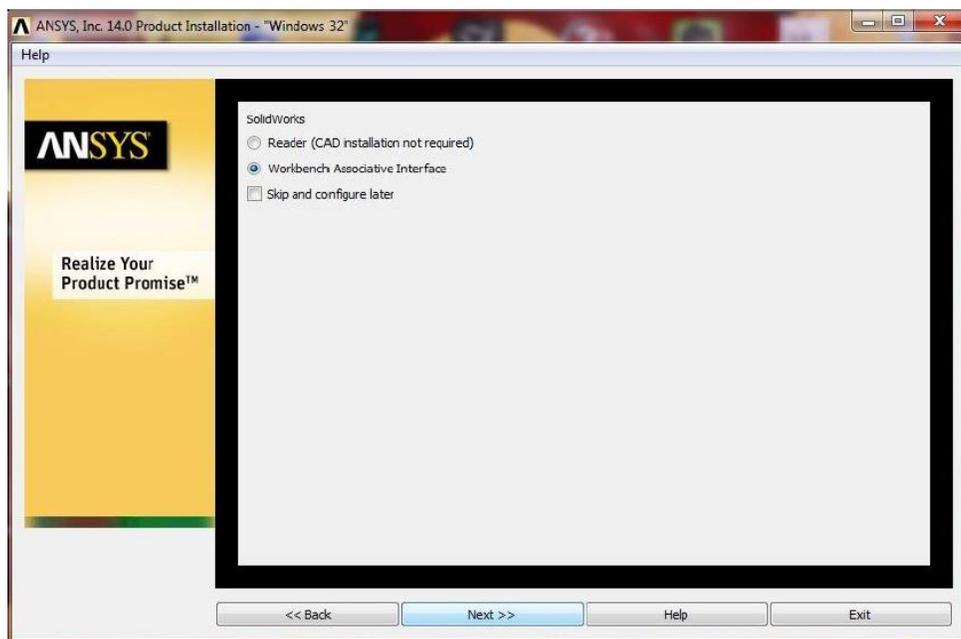
Figura 100. Configuraciones futuras de instalación ANSYS14.0.



Fuente: Sustraída de ANSYS.

Para permitir la función de exportar piezas de otros simuladores en la siguiente imagen muestra como habilitar la exportación desde solidworks e inventor, ver Figura 101.

Figura 101. Exportar desde solidworks e inventor.

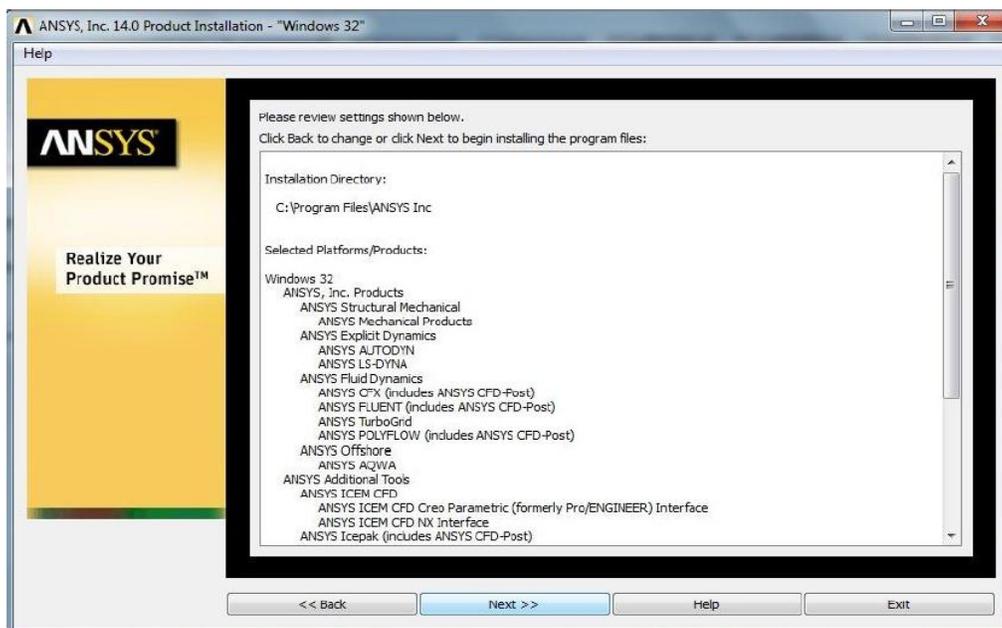


Fuente: Sustraída de ANSYS.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

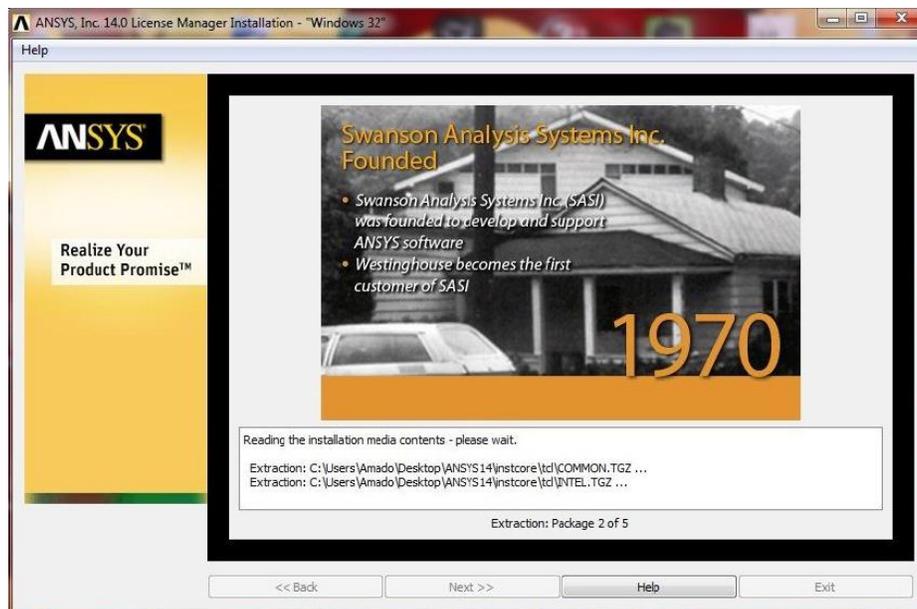
Luego el instalador verifica las condiciones de licencia, de tal manera que se ejecuta next hasta que el instalador empiece la extracción de los archivos, ver Figura 102 y Figura 103. En este proceso la instalación pedirá la entrada de la segunda carpeta de instalación, así que hay que tener presente el lugar de origen para habilitar el cambio.

Figura 102. Verificación de las condiciones de licencia ANSYS 14.0.



Fuente: Sustraída de ANSYS.

Figura 103. Extracción de las condiciones de licencia ANSYS 14.0.

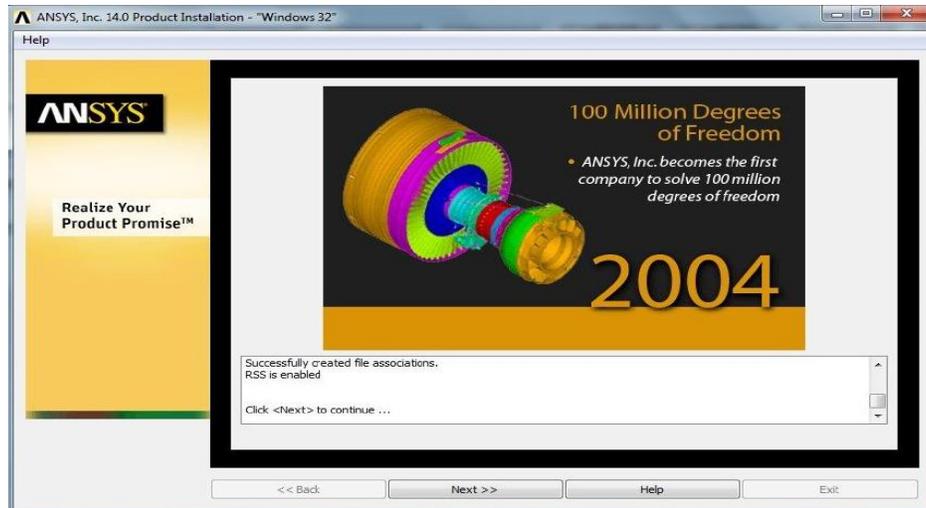


Fuente: Sustraída de ANSYS.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Una vez terminada la extracción de todos los archivos 72 en total, la Figura 104 indica la terminación de la primera etapa de instalación.

Figura 104. Culminación de la instalación de productos ANSYS 14.0.



Fuente: Sustraída de ANSYS.

Se continúa con la habilitación de la licencia, para lo que es necesario ejecutar en el menú de instalación la opción Install ANSYS, Inc. License Manager, ver Figura 105.

Figura 105. Habilidad de la licencia ANSYS 14.0.

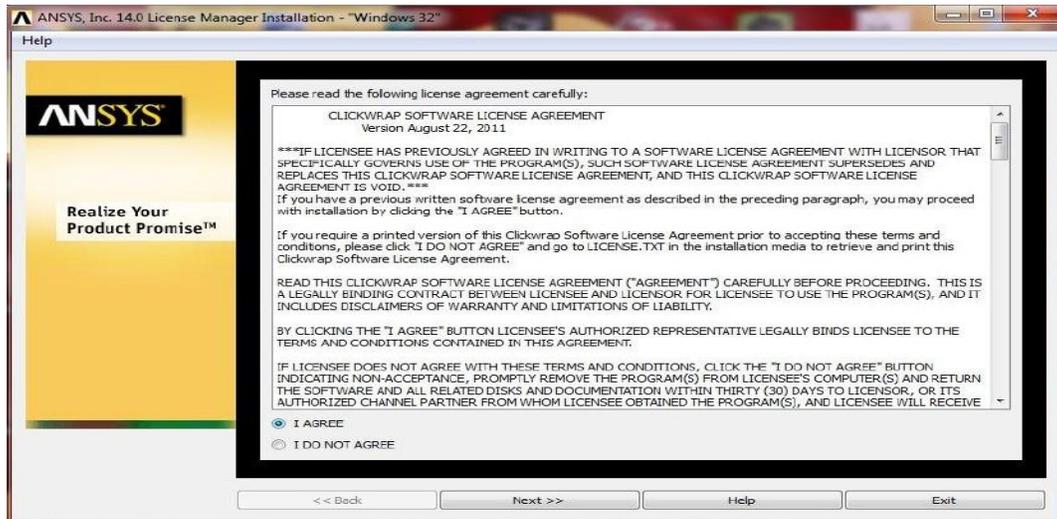


Fuente: Sustraída de ANSYS.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Nuevamente se aceptan las condiciones de privacidad referente a software, ver Figura 106.

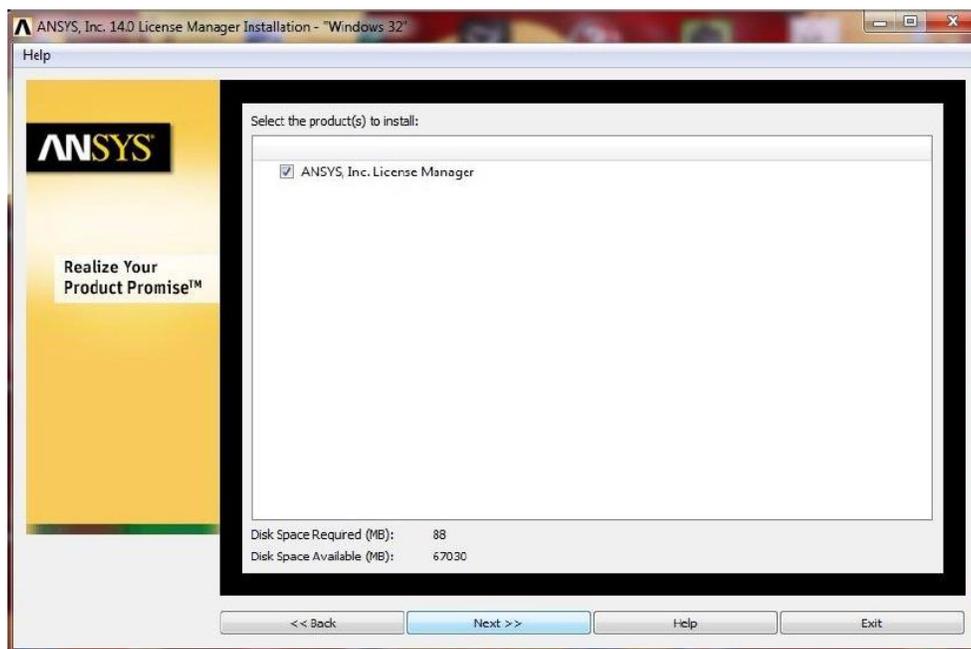
Figura 106. Aprobación de las condiciones de licencia ANSYS 14.0.



Fuente: Sustraída de ANSYS.

Se da clic en next hasta llegar a la siguiente ventana, en donde se habilita la opción Ansys Inc. License Manager, ver Figura 107.

Figura 107. Habilitación de Ansys Inc. License Manager.

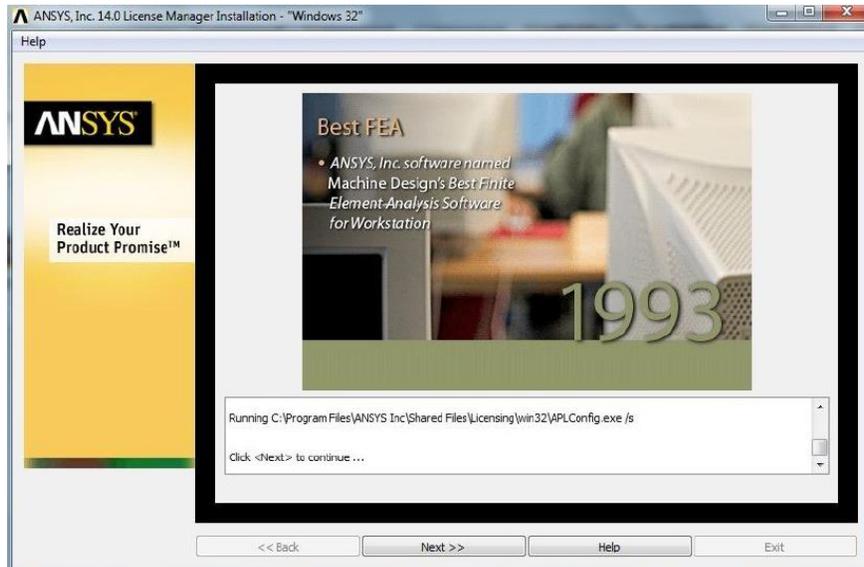


Fuente: Sustraída de ANSYS.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

En las siguientes ventanas se ejecuta next hasta llegar a la extracción de los paquetes requeridos con lo que la instalación comienza con la configuración de licencia, ver Figura 108.

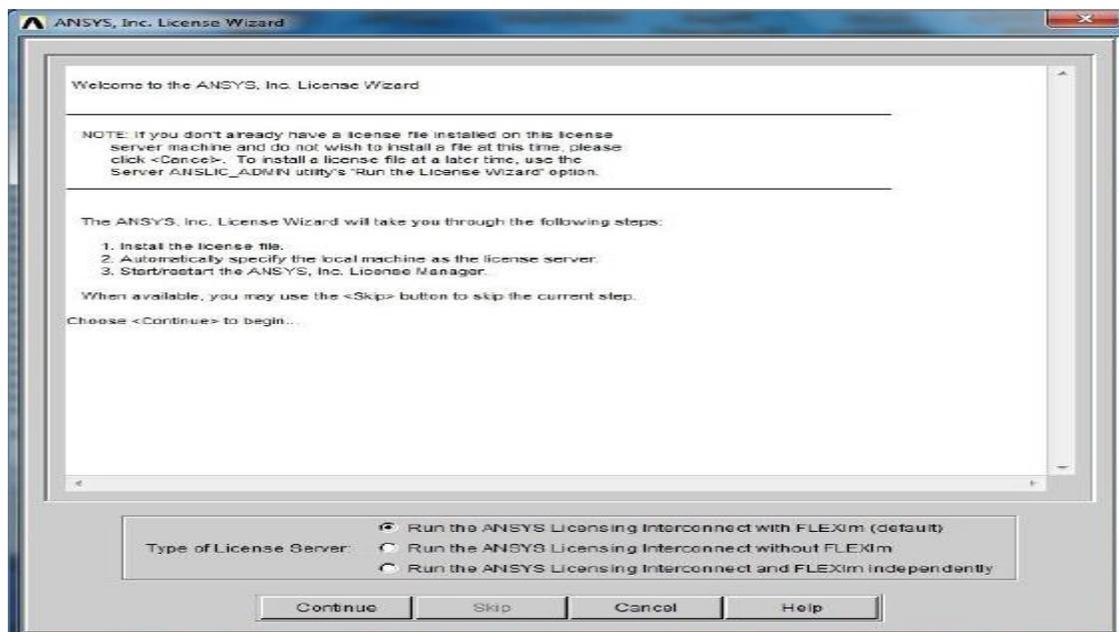
Figura 108. Extracción de los paquetes de licencia ANSYS 14.0.



Fuente: Sustraída de ANSYS.

Se habilita la siguiente Figura 109, para que permita la búsqueda del archivo de licencia que fue ejecutado anteriormente.

Figura 109. Habilitación del archivo de licencia ANSYS 14.0.

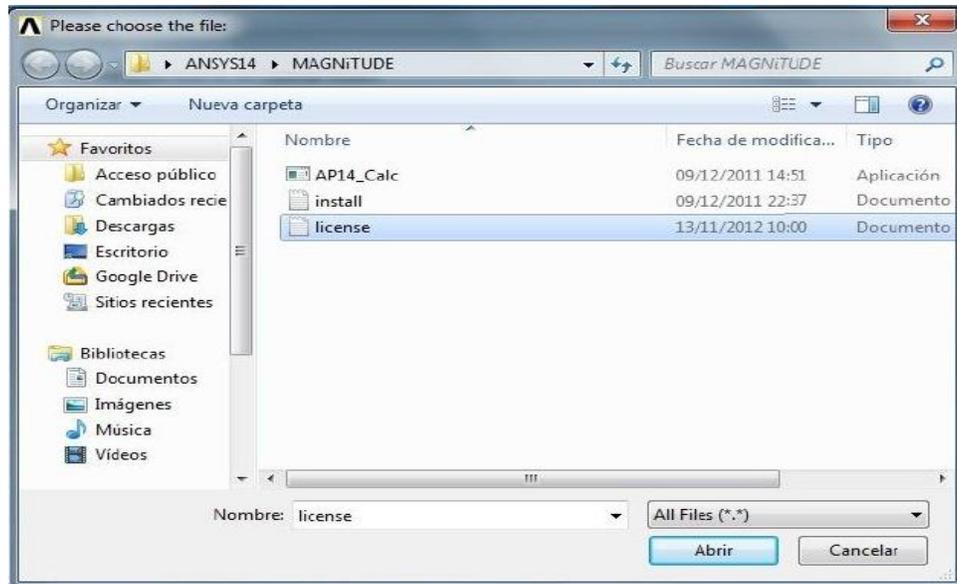


Fuente: Sustraída de ANSYS.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Se busca el archivo license, ver Figura 110, se ejecuta y en las siguientes imágenes se da clic en exit.

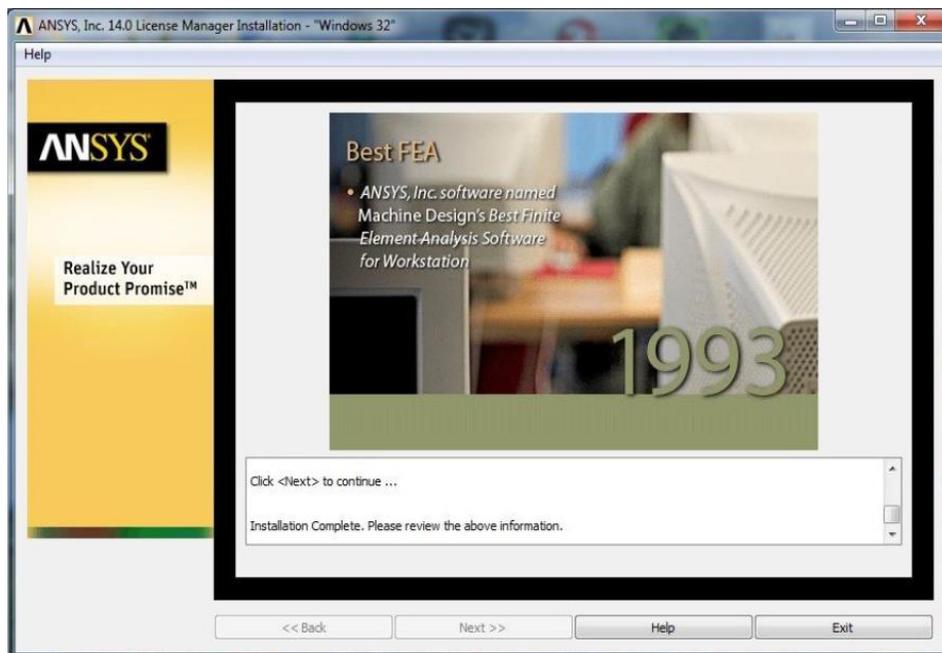
Figura 110. Archivo de licencia ANSYS 14.0.



Fuente: Sustraída de ANSYS.

La siguiente ventana es la última imagen de instalación de licencia, con la que el software Ansys 14.0 queda listo para ser usado, ver Figura 111.

Figura 111. Finalización de la instalación de ANSYS 14.0.



Fuente: Sustraída de ANSYS.

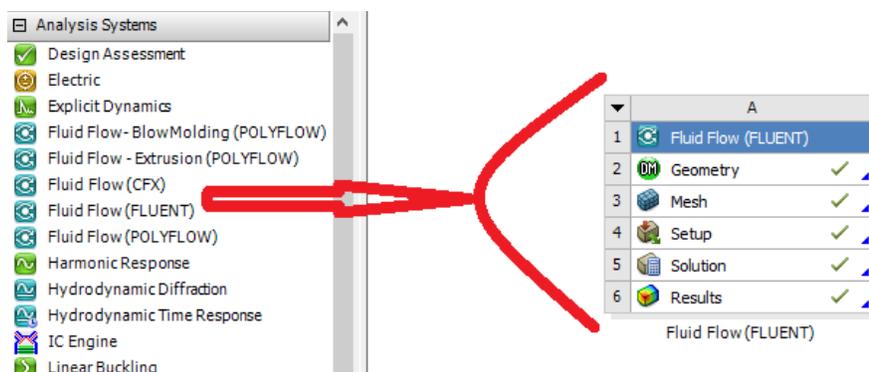
Configuración de FLUENT

De manera general, algunas herramientas software comercial, usado comúnmente en aplicaciones para el tratamiento de fluidos son:

- **Preprocesado (enmallado):** paquete software para refinar el modelo CAD, refiriéndose a la complementación de la estructura, en secciones que se considera hay mayor trabajo computacional. Algunos softwares más reconocidos son: Pro-Engineer, Gridpro, ICEM-CFD, Gambit, etc.
- **Procesado:** programas de cálculo o Solver, encargado de la discretización o aproximación de la solución originada por complejos modelos matemáticos que rigen físicamente a los fluidos en sus diferentes entornos y aplicaciones. Algunas aplicaciones a considerar son Flow-3D, Star-CD, CFD-ACE+, Fluent, TascFlow-CFX, etc.
- **Postprocesado:** se refiere al entorno gráfico, que muestra en escala de colores y en animaciones 2D-3D la aproximación del comportamiento del proceso modelado. Tecplot, Fieldview, Ensignt, etc.

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se cuenta con el software Fluid Flow (FLUENT) que está acondicionado, ver Figura 112 para dar solución a los procedimientos anteriormente planteados (preprocesado, procesado, postprocesado).

Figura 112. Procedimientos del software FLUENT.



Fuente: Propia.

Descripción de algunos parámetros de FLUENT:

- **Geometry:** ítem para desarrollar el modelo CAD o importar desde otro software de modelado.

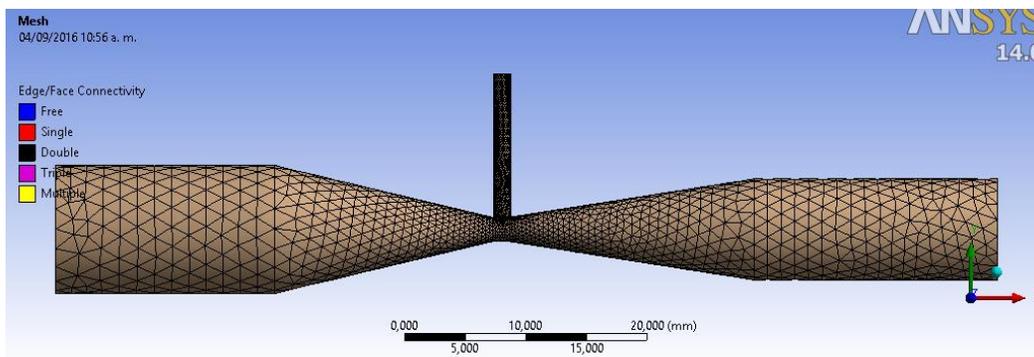
Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

- **Mesh:** por el cual se dividirá la geometría a estudiar en un número finito de particiones, elementos o volúmenes de control, con dos opciones básicas de partida: mallado estructurado y no estructurado.
- **Setup y solution:** entrada de parámetros físicos que regirán el entorno de simulación, propiedades de los fluidos, escogencia del proceso al que se someterá el entorno CAD y los materiales seleccionados, tales como viscosidad, energía, radiación, multifase, etc. Por último selección del método de solución o desratización SIMPLE, PISO, COUPLED y los tiempos de simulación.
- **Results:** entorno gráfico de resultados e interpretación de escala de colores representativos a los diferentes comportamientos que posiblemente tuvieran lugar en un entorno real.

Boquilla Mazzei 484 (Ecoflot)

La implementación secuencial de los parámetros anteriores, descritos para desarrollar la simulación del modelo CAD, genera en primer lugar, un enmallado de la boquilla por el método automático; aquí, se seleccionan las “caras” (áreas transversales de entrada y de salida) del modelo CAD, que permiten el ingreso y la salida del flujo que se desea modelar, ver Figura 113.

Figura 113. Simulación boquilla Mazzei 484.



Fuente: Propia.

Como paso a seguir, se plantea la configuración del “setup” y “solution”. Considerando que en esta sección se define los planteamientos que rigen al modelo, tanto físico como de procesamiento computacional, se hace una breve descripción del procedimiento de configuración.

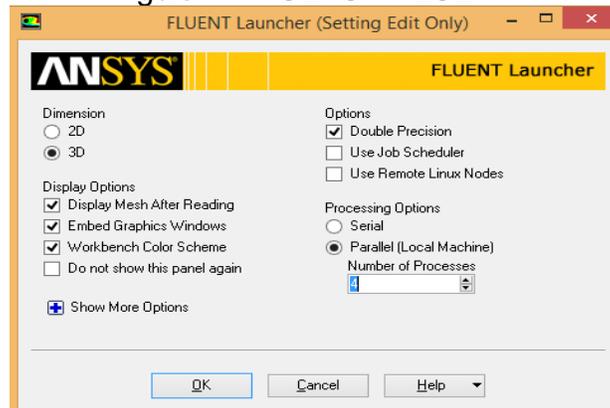
Procedimiento de configuración:

Se inicia dando clic en “**setup**” en el “solver” de FLUENT, inmediatamente se despliega la Figura 114. Se selecciona la opción “Double Precisión” para indicar que

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

se evaluarán los pequeños cambios de diferencias relativas, refiriéndose a Mallas con diferencias en tamaños de elementos significativos, flujos con grandes variaciones de presión, velocidad, temperatura, etc. “**Nombre of Processes**” hace reseña al número de tareas en paralelo que se llevarán a cabo, reflejándose en disminución de tiempo de simulación pero más consumo computacional.

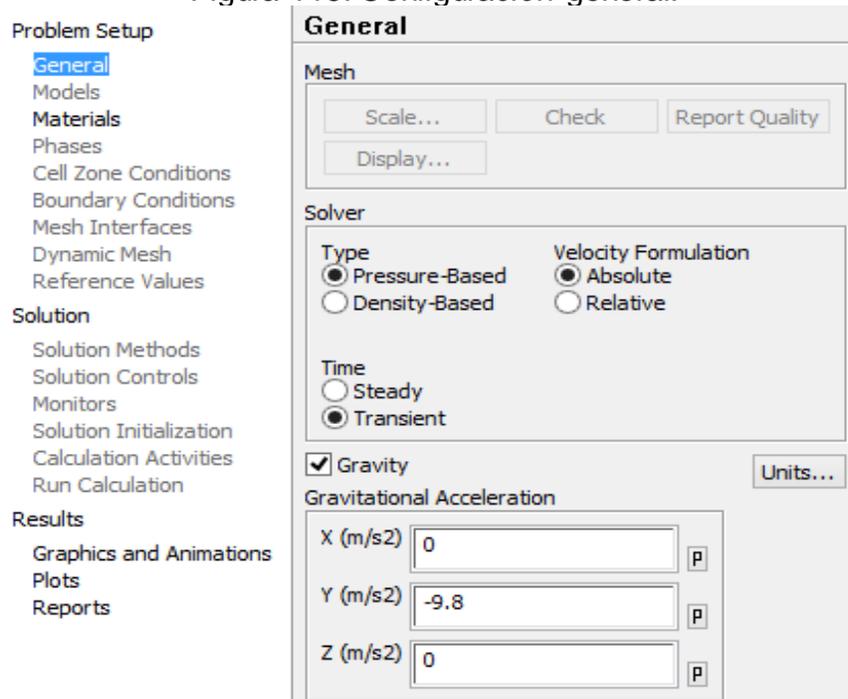
Figura 114. SETUP FLUENT.



Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

Se procede con la configuración general, ver Figura 115, habilitando la gravedad y seleccionando el “solver” de tipo “**Pressure Based**” que indica al software que la simulación va encaminada a un sistema VOF (Volume of Fluid); además, se selecciona un análisis transiente.

Figura 115. Configuración general.

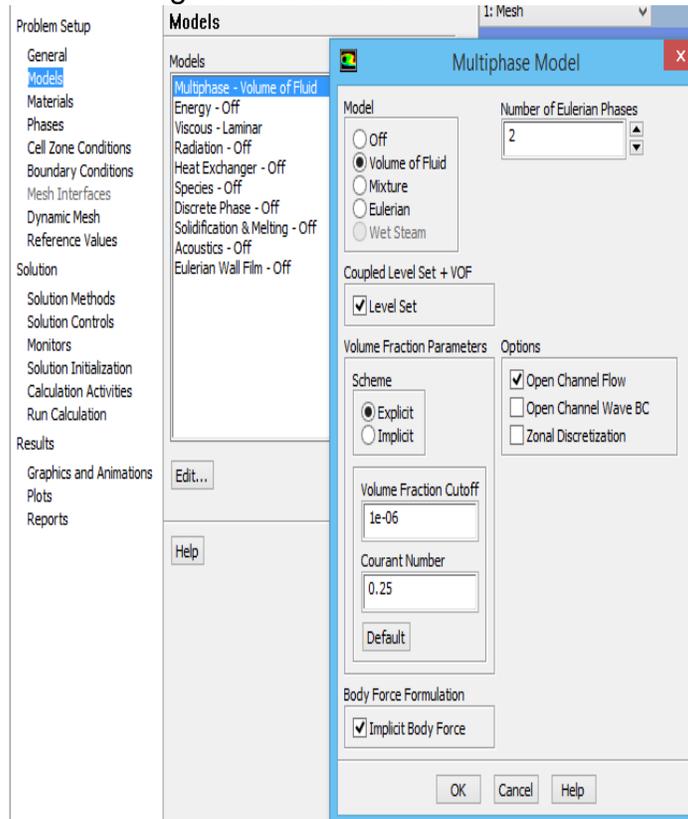


Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

En la sección “**models**”, se selecciona el “**modelo multifase**”, ver Figura 116. En el recuadro de “**level set**” se establece el método preciso para calcular curvatura y fuerzas de tensión superficial, luego, seleccionar “**Open Channel Flow**” el cual permite incorporar los efectos de una superficie libre entre el fluido general y otro más arriba, generalmente atmosfera. Como el objetivo es modelar interfaces, se selecciona el método “**explicit**”.

Figura 116. Sección "Models".



Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

El “Volume Fraction cutoff”, corresponde al valor mínimo que debe alcanzar la fracción de volumen para ser considerado con un valor de cero, es decir, por debajo de este valor se considera la fracción de volumen como divergente.

En lo que refiere al número de Courant, corresponde al máximo valor del número de Courant permitido cerca de la superficie libre. Refleja la porción de celda que será atravesada por el fluido por convección, en un paso de tiempo.

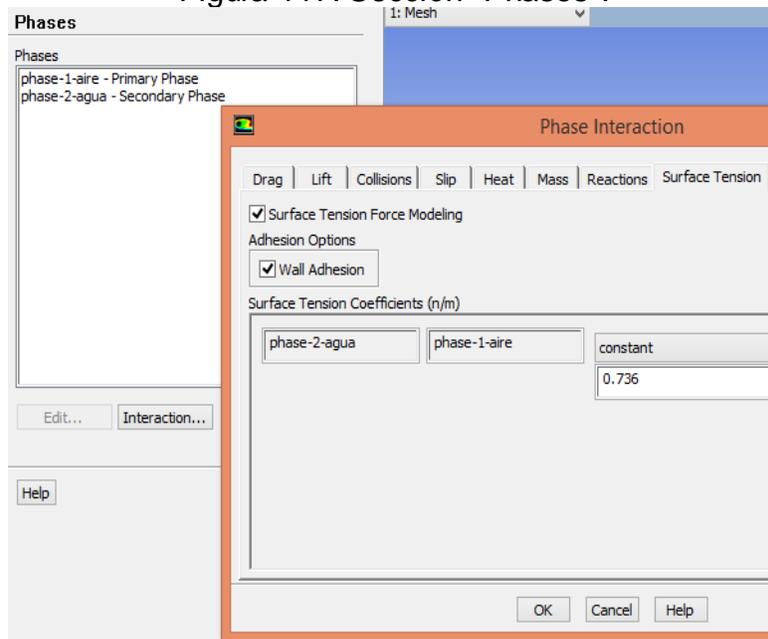
En el campo “Models”, se seleccionan los materiales agua/gas para este caso aire. Se debe ir a la sección “Materials”, y seleccionar Edit, luego “FLUENT Database” y finalmente buscar y copiar el material a usar.

En “Phase”, cuando se ha agregado los materiales se tiene que definir las fases, se escogerá el aire como la primera fase y el agua como la segunda, además se debe agregar efectos de tensión superficial y otros, para ello, en la misma sección de

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

“Phases” se debe clicar en “interaction.” y luego la ventana debe ser configurada totalmente, ver Figura 117.

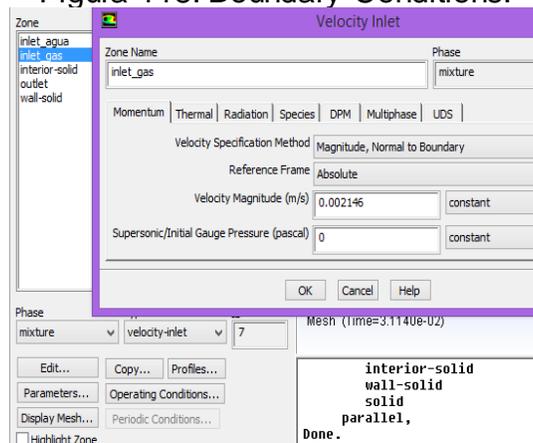
Figura 117. Sección "Phases".



Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

En el área de “Boundary Conditions”, se configuran las condiciones de bordes, la primera condición corresponde a la inyección de gas (aire), para esto se selecciona el sector que corresponde a la cara por donde se inyecta aire, “inlet”, se debe asegurar que en el cuadro “phases” esté seleccionado “mixture” y la condición debe ser de tipo “velocity-inlet”, luego haciendo click en “edit” se debe proceder con la configuración, la cual es como muestra la Figura 118, y de la misma manera para el agua.

Figura 118. Boundary Conditions.

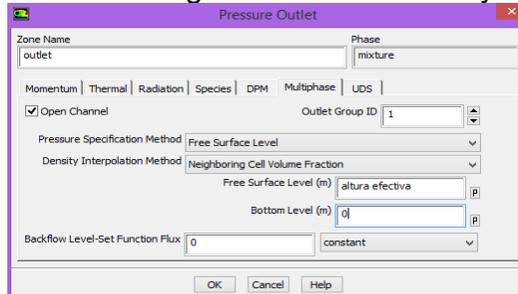


Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Para la configuración de entrada de agua se procede de igual manera, y para la salida, difiere en que se debe especificar la altura efectiva para separar la superficie de acumulación de gases, ver Figura 119.

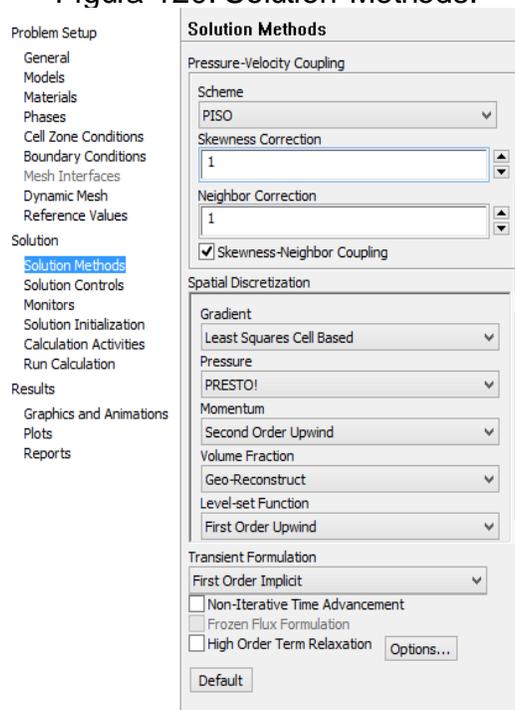
Figura 119. Configuración de entrada y salida.



Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

En la opción “**Método de solución**”, se emplea el método PISO que pertenece a la misma familia de algoritmos SIMPLE pero, con una corrección que consigue satisfacer mejor la ecuación de continuidad en cada iteración.

Figura 120. Solution Methods.

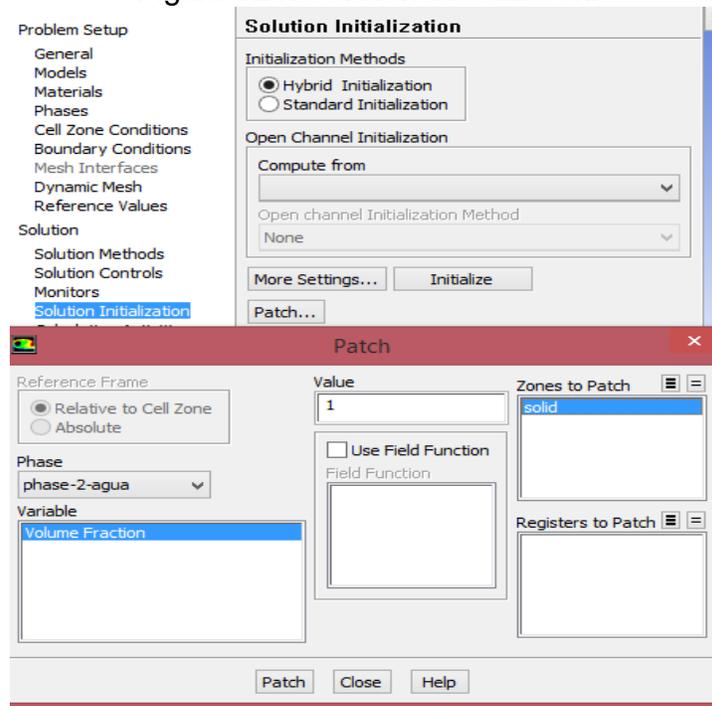


Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

En el campo “Solution initialization”, se selecciona el método “hybrid”, y se da la orden “Initialize”, para proceder a configurar la ventana de la Figura 121, con esta configuración el sistema habilita la interpretación “volumen fraction” para calcular la formación de burbujas.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

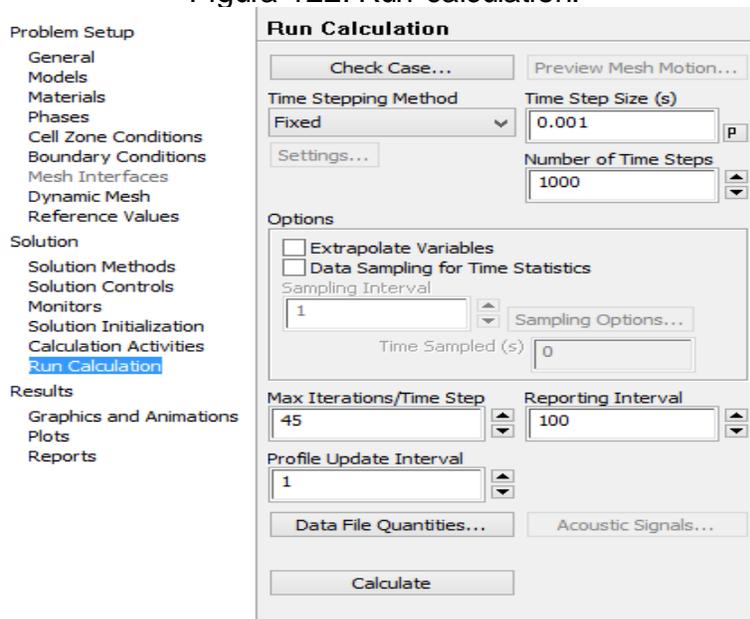
Figura 121. Solution Initialization.



Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

En el campo "Run calculation", finalmente se introduce el tiempo de simulación, el número de interacciones y el número máximo de interacciones por determinada fracción de tiempo simulado. Si el enmallado no es lo suficientemente fino se tendrán problemas con el número de Courant para tiempos grandes de simulación.

Figura 122. Run calculation.



Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Configuración del módulo de equilibrio de población (PBM).

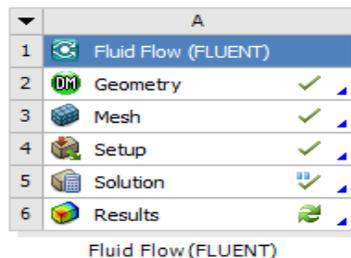
ANSYS FLUENT ofrece tres métodos de solución a la ecuación de equilibrio poblacional basados en estadística:

- El Método Discreto
- El Método Discreto no homogéneo
- El método estándar de Momentos
- El Método de cuadratura de momento.

Para el anterior caso de estudio Capitulo 5, se implementa el método discreto por cuestiones de peso computacional.

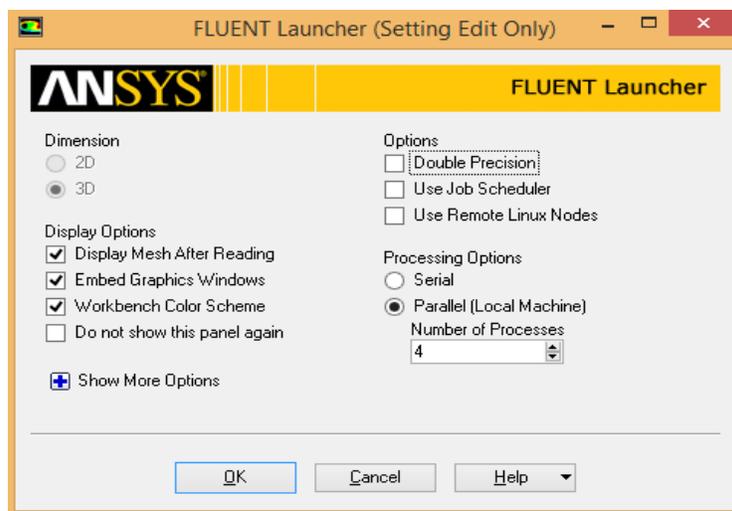
En el módulo Fluid flow (FLUENT) Figura 123, se ejecuta Setup, para seleccionar la opción Double precisión, ver Figura 124.

Figura 123. Setup Fluid flow (FLUENT).



Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

Figura 124. Selección de la opción Double precisión.

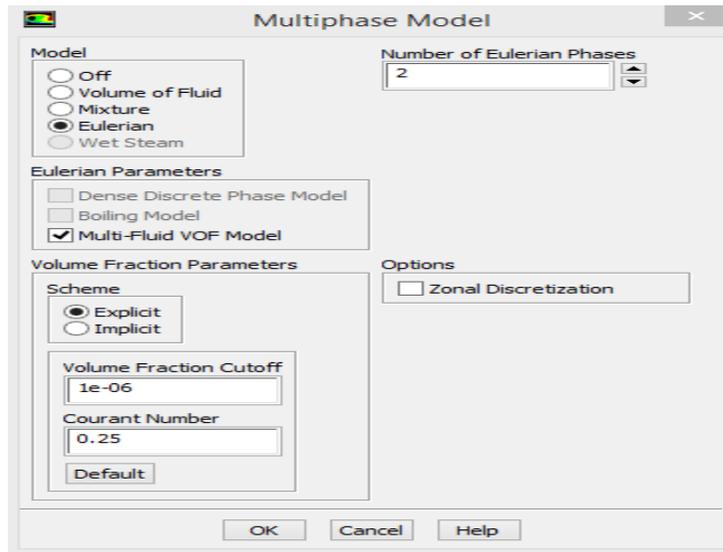


Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

Una vez ejecutado el setup se configura el módulo Multiphase model, configurándolo como se muestra en la Figura 125

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

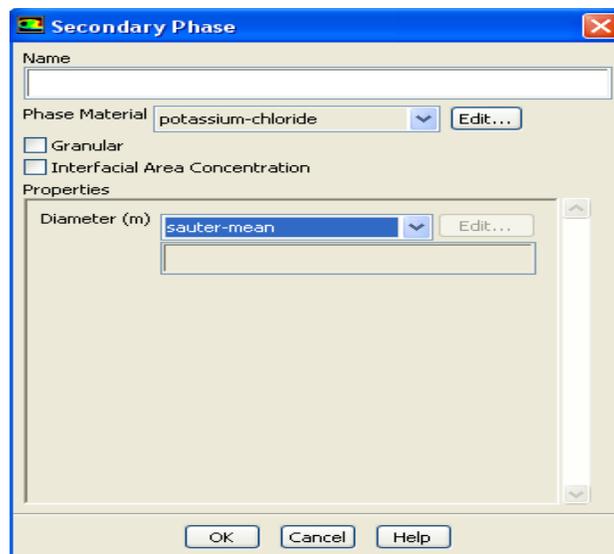
Figura 125. Configuración módulo Multiphase.



Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

Se selecciona el material de la segunda fase y se habilita diámetro de sauter, ver Figura 126. Opcionalmente está permitida la utilización de una función creada por el usuario (UDF), Si se encuentra la necesidad de unos parámetros diferentes, respecto a tamaños y materiales que no estén en la librería de ANSYS.

Figura 126. Configuración del material para la segunda fase.

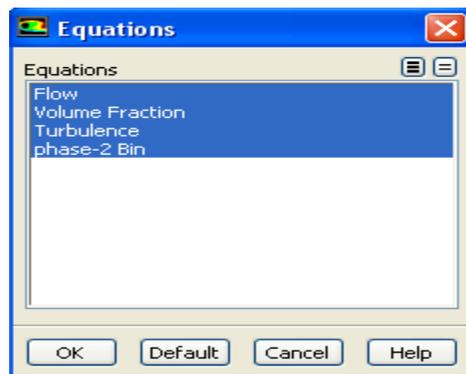


Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

Se seleccionan los parámetros a evaluar Figura 127, dentro del recipiente tales como fracciones volumétricas, turbulencia y modelos multifasicos.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

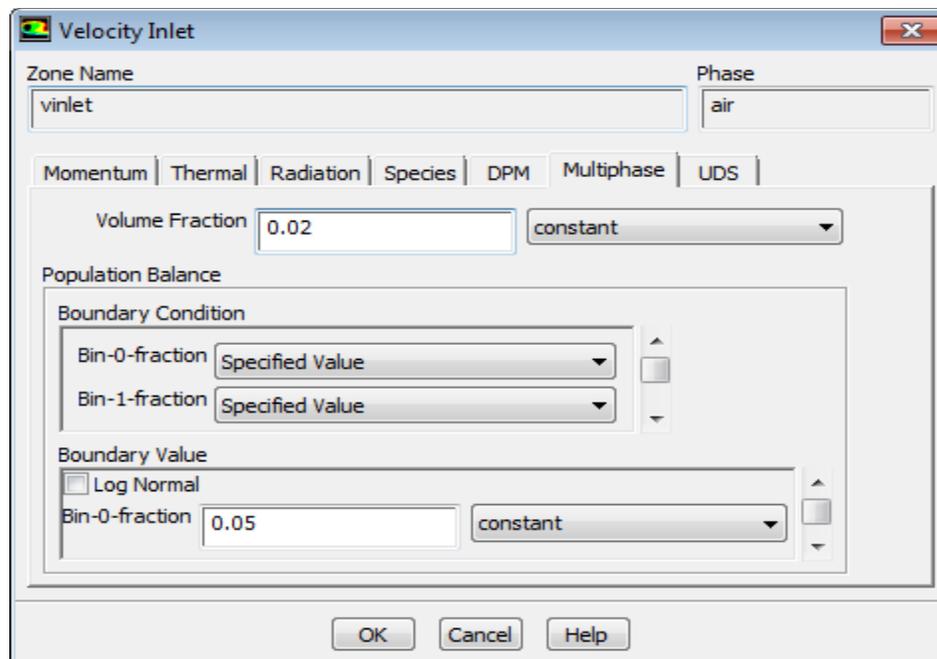
Figura 127. Parámetros a evaluar.



Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

Una vez ingresado al módulo de balance Poblacional se definen las condiciones de frontera Figura 128, se habilitan el número de grupos (i) el valor de las fracciones volumétricas. Se selecciona el tipo de condición de contorno para cada bin o índice de clase, también los tamaños aproximados de microburbujas. Se habilita la distribución logarítmica normal, se introducen los valores de la media y la desviación estándar y se ejecuta el software.

Figura 128. Especificaciones de entrada para equilibrio poblacional.



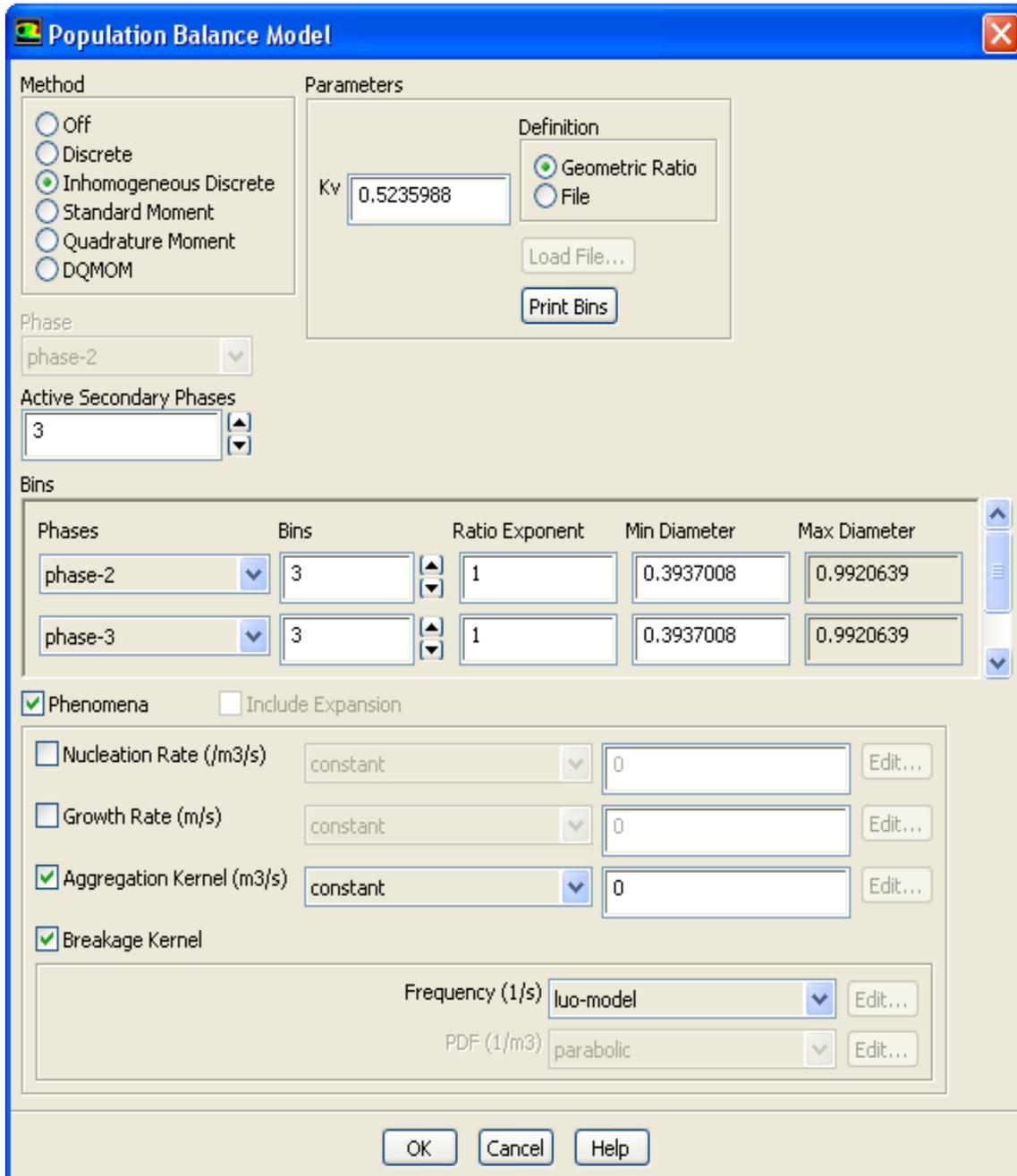
Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

Se especifica el valor para el coeficiente de volumen de partículas K_v , por defecto tiene un valor de $\pi/6$, el número de fases, la cantidad de intervalos o tamaños de microburbujas que se van a utilizar en el cálculo Figura 129. El exponente Q

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

utilizado en la discretización, el diámetro mínimo y máximo. Seleccionar **Geometric Ratio Definition** para que Los tamaños sean listados en orden, desde el más grande al más pequeño.

Figura 129. Configuración módulo de evaluación (PBM).



Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

Finalmente el software muestra los resultados para cada una de las evaluaciones habilitadas y los índices de clase Figura 130, estos resultados también se pueden mostrar en formato PDF.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación
por Inyección de Gas

Figura 130. Resultados de evaluación modulo (PBM).

First 6 Moments computed from PDF:

m0 = 1.730757e+13
m1 = 5.442254e+08
m2 = 2.802300e+04
m3 = 1.909819e+00 (Total Volume Fraction is 9.999800e-01)
m4 = 1.533388e-04
m5 = 1.374813e-08

DQMOM values produced from PDF:

	QP0	QP1	QP2
Length (m)	1.050580e-04	5.154987e-05	1.282842e-05
Volume Fraction	5.452821e-01	4.433921e-01	1.130576e-02
DQMOM-m4 (m)	5.728627e-05	2.285681e-05	1.450350e-07

Fuente: Sustraída de ANSYS FLUENT.

ANEXO C

SIMULACIÓN DE UNA COLUMNA DE BURBUJEO

A continuación se muestra la simulación de una columna de burbujeo de dimensiones 350 mm de alto un radio de base 50 mm y orificio de entrada de gas variable, 10 mm y 12 mm.

Teniendo en cuenta que por derechos de autor de la patente ecoflot y de los diseños Venturi patentados, los planos, dimensiones y contenido de las sustancias de interés no son de dominio público, se plantea una simulación a condiciones ideales de fluido y gas de inyección.

Con el propósito de visualizar la formación de la burbuja se plantea la variación de orificio de entrada y de velocidad de entrada del gas en la columna de burbujeo. Sin embargo la Tabla 24 señala las configuraciones que se llevaron a cabo, en la selección de las herramientas computacionales y la configuración para la alimentación del dispositivo de flotación

Tabla 24. Configuración de FLUENT para recrear la formación de microburbujas en una columna de flotación.

Parámetro	Valor
Geometría	Cilindro de R = 0,1 [m] y H = 0,35 [m]
Materiales	Agua y Aire
Diámetro de inyector	1 [mm]
Condición de inyección de aire	Flujo constante, V = 3,5 m/s
Condición de inyección de agua	Flujo constante, V = 3,5 m/s
Número de elementos de malla	456.200 elementos (hexágonos)
Modelo computacional	VOF
Esquema de discretización temporal	Esquema explícito
Coeficiente de tensión superficial	0,736 [n/m]
Ángulo de contacto	60°
Condiciones de borde	Flujo constante y superficie libre a 0,3 [m]
Algoritmo de solución presión velocidad	Piso
Método de solución para la presión	PRESTO!
Método de solución para el momentum	Second Order Upwind
Método de solución para la fracción de volumen	Geo-Reconstruct
Número de Courant	0,5
Tiempo a simular	1,3 [s]

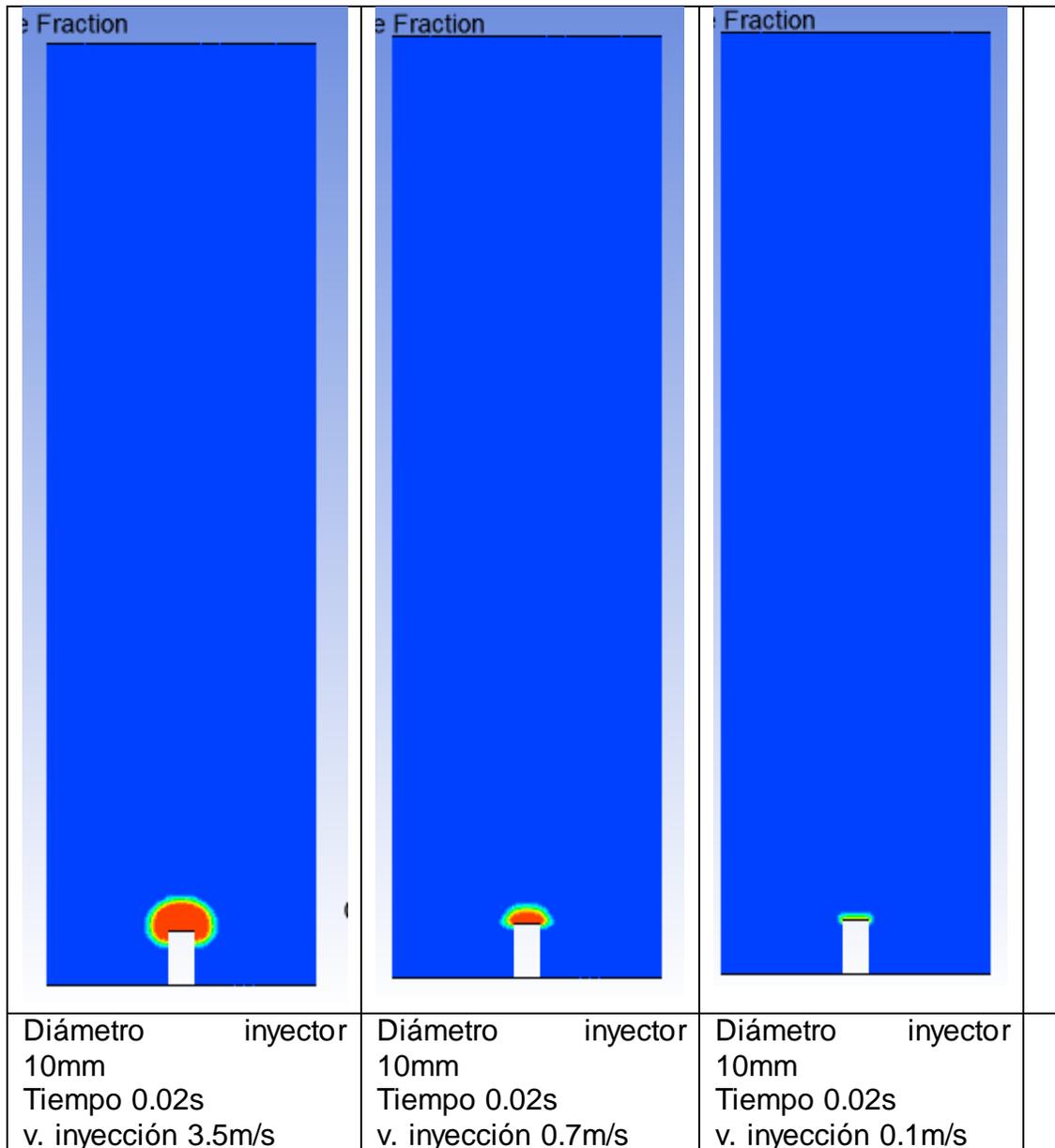
Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

En primera estancia se muestra la formación de burbujas en el entorno 3D de ansys para diferentes velocidades de entrada con el propósito de mostrar la formación de la burbuja en el tiempo.

- a. Formación de la burbuja diámetro inyector 10 mm, velocidad de entrada del gas 3.5, 0.7 y 0.1 tiempo de simulación 0.02 segundos.

Figura 131. Velocidad de entrada del gas variable.



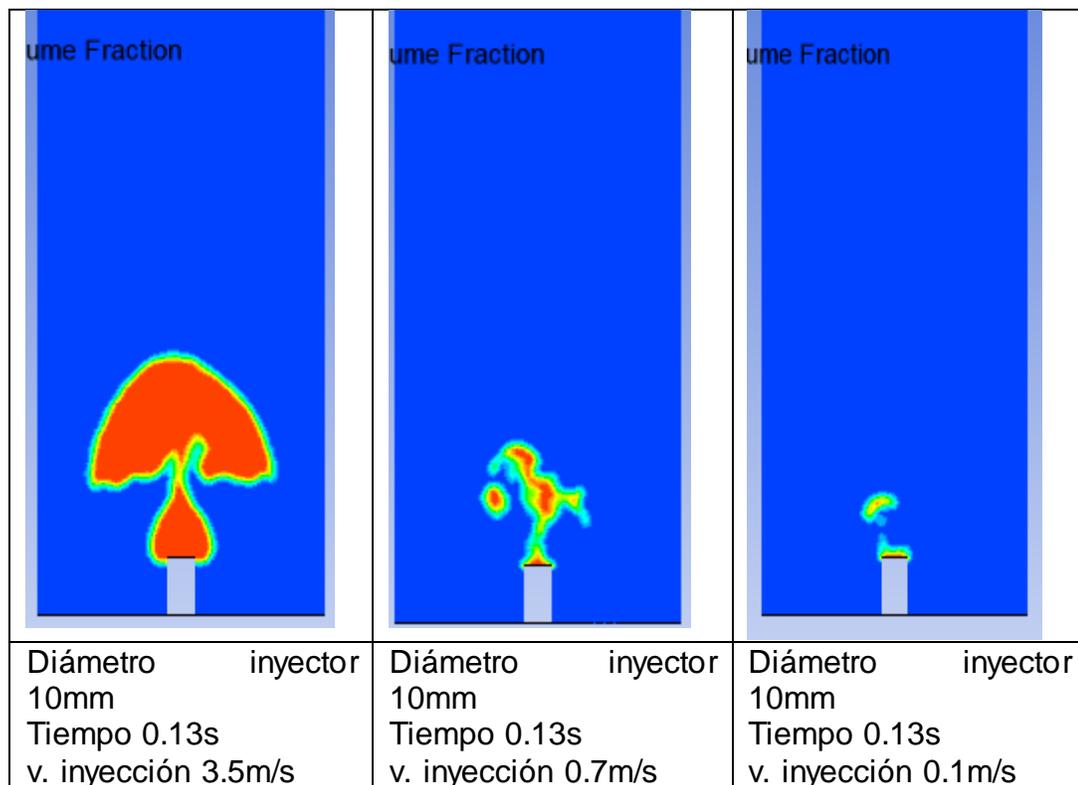
Fuente: Propia.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

El software de simulación, evidencia la importancia de la velocidad de inyección del gas/aire, ya que para el mismo instante de tiempo las burbujas presentan diámetros y volúmenes distintos. Para una velocidad de inyección de 3.5 m/s la burbuja está prácticamente formada a cabalidad, mientras que para una velocidad de inyección de 0.7 m/s la burbuja está prácticamente a la mitad de su formación, y para una velocidad de inyección de 0.1 m/s la burbuja no ha empezado a formarse. Sin embargo a tiempos mayores de simulación las altas velocidades de inyección afectan drásticamente las burbujas, por el fenómeno de coalescencia como se demostrara más adelante.

- b. Desprendimiento de la burbuja para diámetro inyector 10 mm, velocidades 3.5 m/s, 0.7 m/s y 0.1 m/s.

Figura 132. Diámetro del inyector fijo.



Fuente: Propia.

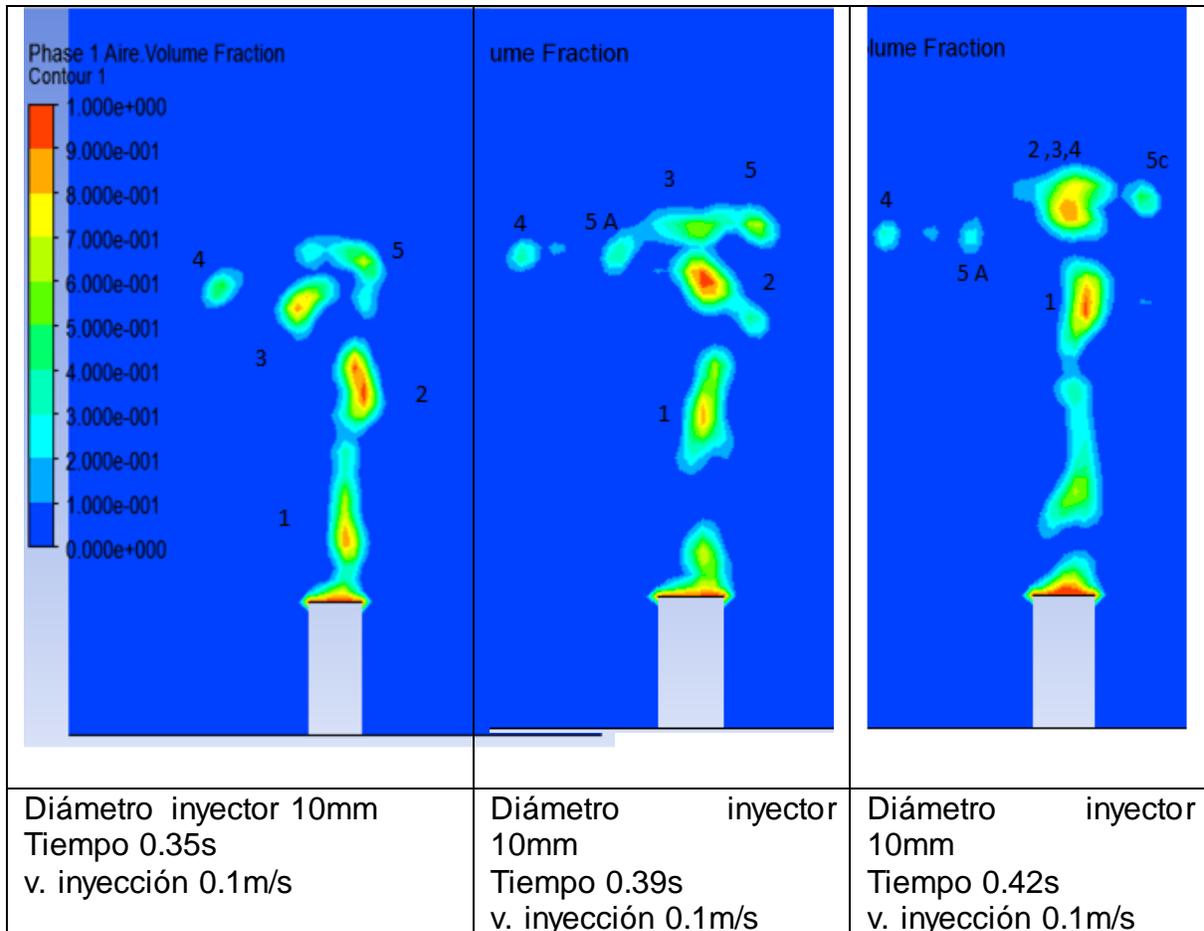
El entorno de simulación muestra las características de la burbuja para tiempo de simulación 0.13 s. exaltando la importancia que tiene la velocidad de inyección del gas/aire en el tiempo de desprendimiento de la burbuja de la boquilla, para una velocidad mayor se forman burbujas con mayor cantidad de gas en su interior, mostrando grandes volúmenes, los cuales no son idóneos para el proceso de esta investigación, pues se evidencia practicante una macro burbuja que ocupa gran porcentaje del radio de la columna de burbujeo, sin embargo para velocidades

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

pequeñas en este caso 0.1 m/s la burbuja ya muestra el primer desprendimiento y un volumen pequeño.

- c. Fenómeno de coalescencia para columna de flotación con diámetro de inyector 10 mm, velocidad de inyección gas/ aire 0.1 s y tiempos variables de la simulación.

Figura 133. Fenómeno de coalescencia.



Fuente: Propia.

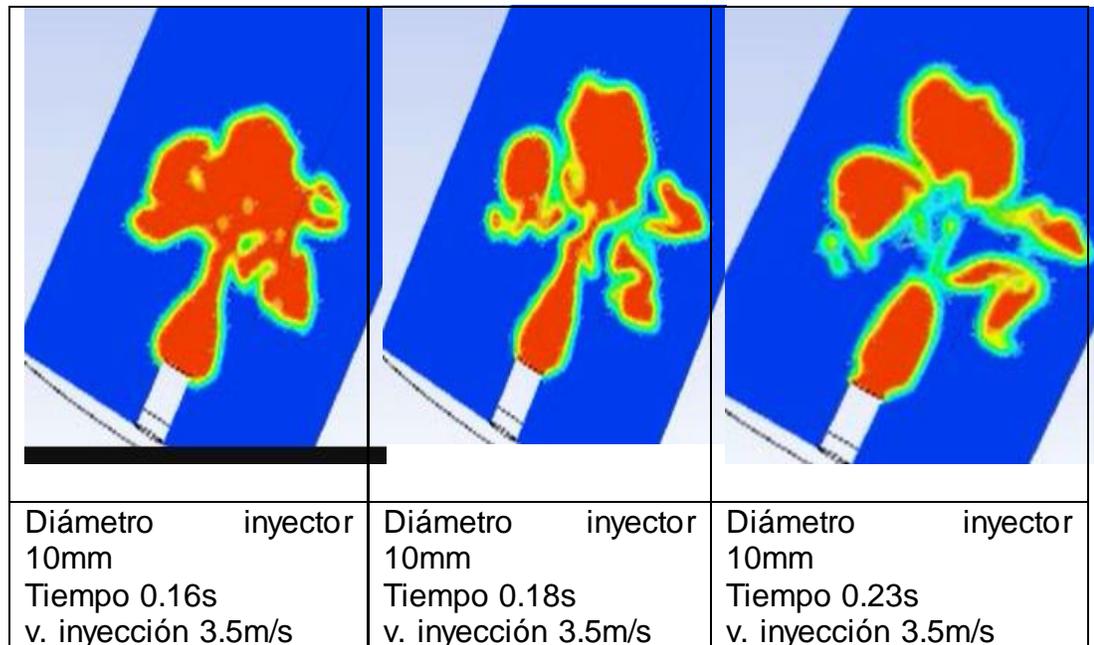
La **Figura 133** muestra la evolución de las burbujas a medida que se van desprendiendo de la boquilla y ascendiendo por la columna de flotación.

Para el tiempo de simulación 0.35s, se han formado 5 burbujas, que se enumeran empezando de la base hacia la superficie. De esta manera se observa que pasados 0.04s la burbuja 2 se acerca a una nueva burbuja formada por las burbujas 5 y 3, mientras que se independiza una burbuja 5ª y sumados otros 0.03s se fusionan las burbujas 2,3 y 4 en una burbuja totalmente independiente, desprendiendo una burbuja de menor diámetro 5C y la burbuja 5ª se aleja de sus predecesoras.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Este fenómeno de coalescencia siempre ocurre en los sistemas de flotación por micro burbujas, según el sistema planteado se evidencia que a medida que se aumenta la velocidad de inyección las burbujas se forman en mayores dimensiones, tiempos cortos pero el fenómeno de coalescencia es más brusco, dando origen a desprendimientos de burbujas con mayor contenido de gas interno, interpretándose como turbulencia Figura 134 puesto que la separación es más rápida. Esto evita la adherencia de las partículas sólidas a la burbuja en un entorno real.

Figura 134. Coalescencia tiempo variable.

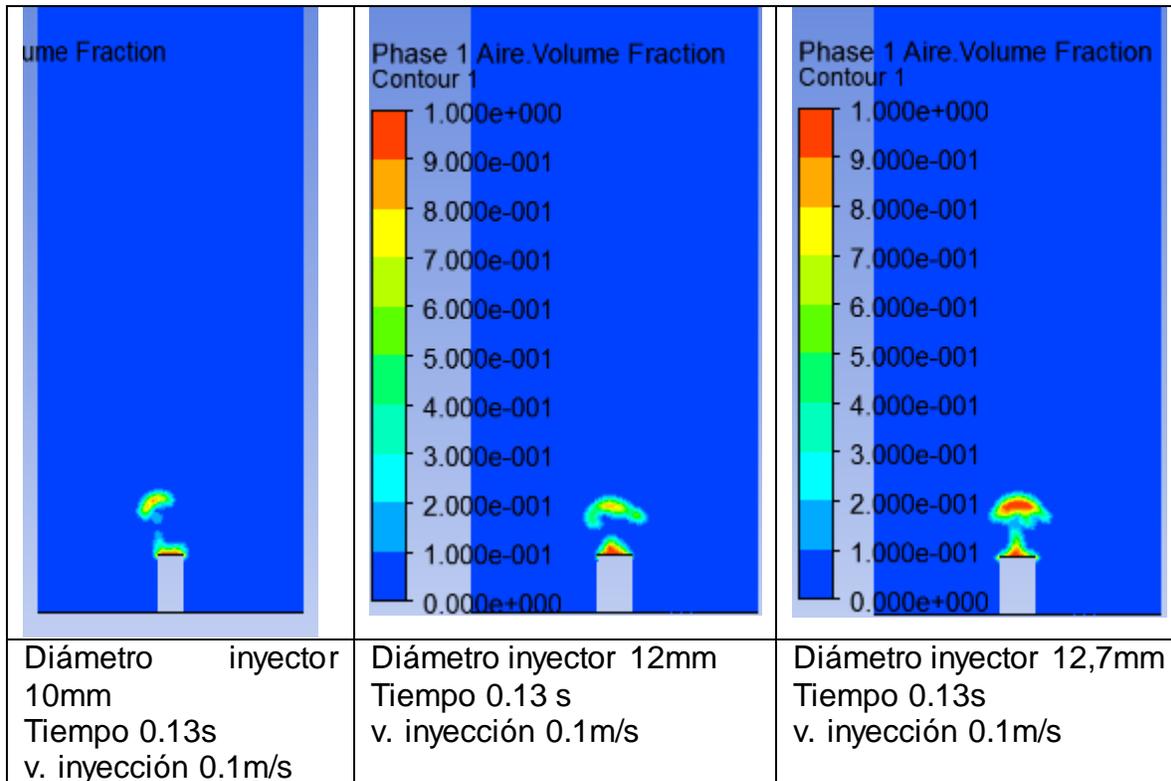


Fuente: Propia.

La segunda propuesta referente al comportamiento de la burbuja en una columna de flotación se desarrolla variando el diámetro del inyector y una entrada de aire/gas constante 0.1 m/s, se presenta en la Figura 135, mostrando que no influye significativamente, pues a los tiempos 0.13 seg se muestra una formación de burbuja similar a los inyectores 10 mm velocidad 1 m/s con la configuración 12 mm velocidad 1 m/s y finalmente 12.7 mm siendo esta última aproximada a las tuberías comúnmente usadas de 12" +/- 12,7 mm.

Propuesta de un Sistema de Separación Crudo-Agua por la Técnica de Flotación por Inyección de Gas

Figura 135. Variando el diámetro del inyector.



Fuente: Propia.

La variación del diámetro del inyector no influye drásticamente en la forma inicial de la burbuja, más sin embargo si en el tiempo de desprendimiento y el tamaños de la burbuja tanto en volumen como en la cantidad de gas dentro de esta, reflejando un cambio de presión interna diferente, viéndose reflejado en un acenso rectilíneo comparado con el inyector de menor diámetro.