



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS**

**MEDICIÓN DE TAMAÑOS DE BURBUJAS MEDIANTE USO DE SONIDO Y
SU APLICACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DE CURVAS DE
COALESCENCIA PARA BURBUJAS GENERADAS EN UNA CELDA DE
FLOTACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN METALURGIA EXTRACTIVA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

CARLOS ALEJANDRO MORAGA CRUZ

**PROFESOR GUÍA:
SR. WILLY KRACHT GAJARDO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SR. LEANDRO VOISIN ARAVENA
SR. CHRISTIAN IHLE BASCUÑÁN
SR. CLAUDIO ACUÑA PÉREZ**

**SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2014**

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil de Minas y
Magíster en Ciencias de la Ingeniería
Mención Metalurgia Extractiva.**

Es bien sabido que el tamaño de burbuja en flotación es una variable importante, sin embargo, no es monitoreada debido a lo complejo que es su medición. En la actualidad la técnica utilizada para determinar los diámetros de burbujas se basa en la medición a través de la captura de imágenes y posterior análisis, pudiéndose utilizar sólo con fines de diagnóstico operacional.

En este trabajo se utilizan las propiedades acústicas de las burbujas para desarrollar una técnica de medición alternativa al análisis de imágenes. La técnica desarrollada consiste en la excitación de burbujas con una fuente de ultrasonido de intensidad fija y frecuencia variable. De este modo, se realiza un barrido de frecuencias con el fin de estimular todo el rango de tamaños que compone la distribución de tamaños de burbujas. Con este procedimiento se logró relacionar la intensidad de respuesta promedio de las burbujas con el diámetro de Sauter (d_{32}) de la distribución. La relación entre intensidad y diámetro de Sauter es lineal, pero no única. Para pruebas en sistema bifásico, agua-aire, y trifásico, agua-aire-partículas, se observa que las curvas tienen igual pendiente, pero se encuentran desplazadas una respecto de la otra, esto es, presentan diferente coeficiente de posición. El coeficiente de posición también varía al cambiar la intensidad de señal aplicada, por lo tanto, el equipo debe ser calibrado contra análisis de imágenes (que es considerado como el estándar hoy en día), antes de realizar las mediciones. No obstante lo anterior, la técnica acústica de medición de tamaños de burbujas presenta ventajas respecto a la medición por análisis de imágenes: la medición se puede automatizar y el procesamiento se puede realizar en línea sin mayor dificultad.

La técnica desarrollada se utilizó para estudiar el comportamiento de espumante (MIBC) y sal (NaCl) en la prevención de coalescencia de burbujas. Se estudió el parámetro CCC95 y los tamaños límites (d_{32} límite) generados en la celda de flotación de laboratorio. Se concluye que el tamaño mínimo depende de la velocidad de agitación mientras que el parámetro CCC95 resulta ser un resultado único para el tipo de reactivo utilizado y las condiciones probadas.

Completamente dedicado a mi madre.
Y al mejor de los padres, el mío.

AGRADECIMIENTOS

Debo comenzar por darle las gracias a mi mamá, que desde un lugar mejor me guía y me acompaña a cada minuto. Agradecerle por dejarme seguir sintiendo su presencia y por ser la luz que ilumina el camino que sigo recorriendo y descubriendo. Muchas gracias mamita, sin ti no podría haber llegado hasta aquí ni seguir avanzando.

También quiero agradecer a mi papá por haberme dado todo lo que he necesitado y mucho más. Gracias por tu infinita y eterna paciencia, por esperar hasta el último al más chico de tus hijos y porque siempre te has sentido orgulloso de mí. Quisiera decirte que por mi parte no puedo sentirme más feliz y orgulloso de tenerte como padre y que te quiero mucho.

Me gustaría también darles las gracias a mis hermanos, Orieta y Eduardo, mis segundos papás. Muchas gracias por cuidarme, por todos los consejos que me han dado y por incluirme en las bellas familias que ambos han formado.

Un especial agradecimiento a Nonita a quién encontré sin querer queriendo, y que fui queriendo y queriendo, más cada vez. Muchas gracias por encontrarme y por hacer mis días mucho más alegres y mi vida mucho más interesante. ¡Te quiero mucho!! Y agradezco a su familia, en especial a la Chicho, por haberme acogido de tan buena manera.

No podría dejar de darles las gracias a mis tíos, Lya y Enrique, y a su familia por haberme dejado vivir con ellos tantos años y por todo el cariño que me han dado, haciéndome sentir como un hijo para ellos.

A mis amigos y compañeros que he conocido, en especial a mis camaradas de radio Denis y Rodrigo, muchas gracias por soñar juntos y por las horas y horas de entretención que pasamos.

Finalmente quisiera agradecer a Willy, mi profesor guía, por todos los conocimientos que compartió conmigo y por la buena disposición que siempre mostró. Agradecer a toda la gente del laboratorio de procesamiento de minerales, en especial don Óscar, quién siempre estuvo dispuesto a prestarme su ayuda y su experiencia, pero por sobre todo su amistad.

TABLA DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivos Generales	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Alcances	2
2	CAPÍTULO II: ANTECEDENTES	4
2.1	Definición de Variables Relativas al Aire en Flotación	4
2.1.1	Distribución de Tamaños de Burbujas	4
2.1.2	Contenido de Aire.....	5
2.1.3	Velocidad Superficial de Gas	5
2.1.4	Flujo Areal Superficial de Gas	6
2.2	Medición de Distribución de Tamaños de Burbujas	7
2.3	Burbujas Como Fuente de Sonido	8
2.3.1	Ondas Acústicas.....	8
2.3.2	Detección y Procesamiento de Señales Sonoras	9
2.3.3	Burbujas y Sonido	11
2.4	Generación de Distribuciones de Tamaños de Burbujas.....	18
2.4.1	Ruptura de Burbujas.....	18
2.4.2	Coalescencia de Burbujas	20
	PARTE I: DESARROLLO DE UNA TÉCNICA DE MEDICIÓN POR MEDIOSACÚSTICOS.....	26
3	CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE TÉCNICA ACÚSTICA	27
3.1	Equipos y Materiales	27
3.1.1	Generación de Burbujas	27
3.1.2	Medición por Medios Acústicos	28
3.1.3	Reactivos Utilizados.....	34
3.2	Posibles Configuraciones de Medición por Medios Acústicos ...	34
3.2.1	Resonancia Heterodina	35

3.2.2	Resonancia Heterodina Inversa	35
3.2.3	Modificación de Esquema Resonancia Heterodina	36
3.3	Funcionamiento del Equipo de Medición por Medios Acústicos y Generación de Burbujas.....	38
3.3.1	Generación y paso de burbujas	38
3.3.2	Aparatos Electrónicos	39
3.4	Procesamiento de Señales de Audio	40
3.5	Procedimiento y Campaña Experimental	41
4	CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE TÉCNICA ACÚSTICA	43
4.1	Elección de Configuración Utilizada	43
4.2	Modelo Tamaño Burbuja v/s Intensidad de Señal	44
4.2.1	Pruebas Distribuciones Monotamaño.....	44
4.2.2	Pruebas DTB en Sistema Bifásico	46
4.2.3	Pruebas DTB en Sistema Trifásico	48
5	CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE TÉCNICA ACÚSTICA.....	51
5.1	Monotamaños de Burbujas.....	51
5.2	DTB en Sistema Bifásico – Intensidad de Señal.....	52
5.3	DTB en Sistema Trifásico – Intensidad de Señal.....	53
	PARTE II: APLICACIÓN DE TÉCNICA ACÚSTICA EN EL ESTUDIO DE CURVAS DE COALESCENCIA PARA DISTINTOS REACTIVOS....	55
6	CAPÍTULO VI: METODOLOGÍA DE ESTUDIO DE CURVAS DE COALESCENCIA.....	56
6.1	Equipos y Materiales	56
6.1.1	Reactivos Utilizados.....	56
6.2	Procedimiento y Campaña Experimental	56
7	CAPÍTULO VII: RESULTADOS DE ESTUDIO DE CURVAS DE COALESCENCIA.....	58
7.1	Reproducibilidad	58
7.2	Curvas Espumante MIBC.....	59
7.3	Curvas NaCl	65
7.4	Test ANOVA	70

8	CAPÍTULO VIII: DISCUSIÓN ESTUDIO DE CURVAS DE COALESCENCIA.....	73
8.1	Curvas Espumante MIBC.....	73
8.2	Curvas NaCl	75
9	CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
9.1	Técnica de Medición por Medios Acústicos	77
9.2	Curvas de Coalescencia	79
9.2.1	Curvas Espumante MIBC.....	79
9.2.2	Curvas NaCl	80
9.2.3	Curvas de Coalescencia en General	81
9.3	Recomendaciones	82
10	BIBLIOGRAFÍA.....	83
	ANEXOS	87
	ANEXOS A: Códigos Programados.....	88
	A.1 Código Para Emisión y Recepción de Señales con Tarjeta NI Programado en C++	88
	A.2 Código Para Análisis de Señales Programado en Matlab	101
	ANEXOS B: Configuraciones Descartadas.....	102
	B.1 Pruebas Resonancia Heterodina	102
	B.1.1 Pruebas en configuración espacial ortogonal.....	102
	B.1.2 Pruebas en configuración espacial en línea de vista (LOS).....	104
	B.2 Resonancia Heterodina Inversa	106
	B.2.1 Pruebas en configuración espacial ortogonal.....	106
	ANEXOS C: Resultados Modelo Intensidad de Señal y DTB.....	111
	C.1 Calibración Rotámetro	111
	C.2 Variables Descartadas Para Construcción del Modelo	111
	C.3 Pruebas Construcción Modelo (Sistema Bifásico).....	113
	C.3.1 Set de Mediciones 1	114
	C.3.2 Set de Mediciones 2	122
	C.3.3 Set de Mediciones 3	130
	C.4 Pruebas Sistema Trifásico	138

ANEXOS D: Resultados Pruebas Curvas de Coalescencia.....	143
D.1 Resultados de Reproducibilidad	143
D.2 Resultados.....	143
D.2.1 Resultados Pruebas con MIBC	143
D.2.2 Resultados Pruebas con NaCl	144
D.3 Ajuste de Curvas de Coalescencia.....	145
D.3.1 Ajuste MIBC.....	145
D.3.2 Ajuste NaCl.....	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diámetro d_{32} versus J_g para cuatro tipos distintos de celdas de flotación [8].	6
Figura 2. Esquema del analizador de burbujas de la Universidad McGill [10].	7
Figura 3. Propagación de una onda sonora con atenuación [13].	9
Figura 4. Ejemplo de aplicación FFT: a) señal en el tiempo; b) FFT aplicada a la señal en el tiempo.	10
Figura 5. Modelación de una burbuja de radio a en un líquido de densidad ρ oscilando a amplitud A_0 [18].	12
Figura 6. Análisis de frecuencias del sonido producido por la generación de burbujas de 2 tamaños [20].	13
Figura 7. Amplitud de sonido en función de distancia horizontal al hidrófono (rectángulos) y distancia vertical al hidrófono (círculos) [21].	14
Figura 8. Esquema del método propuesto por Buckey et al. [22]: f_p es la frecuencia portadora; f_m es la frecuencia modulada.	15
Figura 9. Acoplamiento de señales a frecuencias [23]: a) $f_p \pm f_m$; b) $f_p \pm f_m/2$.	16
Figura 10. Procedimiento de resolución con método iterativo.	17
Figura 11. Tamaños de burbujas en función del flujo de aire para distintos tipos de celda [30].	19
Figura 12. Tamaños de burbujas en función de la velocidad de agitación para distintos tipos de celda [30].	19
Figura 13. Efecto de la adición de espumante en la forma de la DTB [31].	20
Figura 14. Equivalencia entre concentración de MIBC y concentración de NaCl [32].	21
Figura 15. Forma estándar de curvas de coalescencia y método de obtención de CCC de manera gráfica [34].	21
Figura 16. Efecto de aumento de J_g en CCC95 [38].	23
Figura 17. Curva de prevención de coalescencia (I-CCC) para MIBC [33].	24
Figura 18. Curva de prevención de coalescencia (I-CCC) para NaCl: prevención parcial y prevención completa [33].	25
Figura 19. Tubos capilares utilizados para la generación de monotamaños.	27
Figura 20. Celda de flotación laboratorio Labtech-ESSA.	28
Figura 21. Cámara de medición de acrílico.	29
Figura 22. Transductor Reson TC3027 con sus respuestas en frecuencia.	30
Figura 23. Bomba peristáltica con mangueras flexibles.	30
Figura 24. Fuente de poder y generados de funciones.	31
Figura 25. Buffer carrier audio y modulador AM.	32

<i>Figura 26. Filtros de señales.</i>	32
<i>Figura 27. Multiplicador de señales (mixer).</i>	33
<i>Figura 28. Amplificador de carga Brüel & Kjaer.</i>	33
<i>Figura 29. Tarjeta de adquisición de datos NI.</i>	34
<i>Figura 30. Diagrama esquemático configuración resonancia heterodina.</i>	35
<i>Figura 31. Diagrama esquemático configuración resonancia heterodina inversa.</i>	36
<i>Figura 32. Esquema proceso de generación de señal que excita burbujas.</i>	36
<i>Figura 33. Esquema proceso de demodulación.</i>	37
<i>Figura 34. Diagrama esquemático configuración modificada de resonancia heterodina.</i>	37
<i>Figura 35. Sistema Medición tamaño burbujas generando ultrasonido con tarjeta National Instruments.</i>	38
<i>Figura 36. Disposición de equipos en laboratorio.</i>	40
<i>Figura 37. Comportamiento del sistema: a) señal sistema sin burbujas; b) señal sistema con burbujas; c) espectro de frecuencias sistema sin burbujas; d) espectro de frecuencias sistema con burbujas.</i>	43
<i>Figura 38. Intensidad de señal de distribución monotamaño de burbujas, correspondiente a una frecuencia natural de 2,1 [kHz] medida en la generación.</i>	45
<i>Figura 39. Intensidad de señal de distribución monotamaño de burbujas, correspondiente a una frecuencia natural de 2,6 [kHz] medida en la generación.</i>	45
<i>Figura 40. Ejemplo de prueba estándar de barrido de frecuencia: a) Barrido para DTB generada en celda de flotación; b) Barrido para DTB a las mismas condiciones operacionales anteriores.</i>	46
<i>Figura 41. Barrido de frecuencias: a) Condición 1: velocidad de agitación 400 rpm, flujo de aire 10 lt/min, concentración espumante 15 ppm MIBC; b) Condición 2: velocidad de agitación 300 rpm, flujo aire 10 lt/min, concentración espumante 5 ppm MIBC.</i>	47
<i>Figura 42. Relación diámetro d_{32} e intensidad de señal acústica.</i>	48
<i>Figura 43. Pruebas para sistema con presencia de mineral.</i>	49
<i>Figura 44. Modelo de respuesta de una burbuja al ser estimulada con la configuración utilizada: a) tamaño de burbuja no correspondiente a la frecuencia de excitación; b) tamaño de burbuja correspondiente a la frecuencia de excitación.</i>	51
<i>Figura 45. Reproducibilidad de experimentos. Condiciones operacionales: agitación 400 [rpm], flujo de aire 10 [lt/min], concentración MIBC variable.</i>	58

<i>Figura 46. Curvas de coalescencia MIBC para velocidad de agitación 300 [rpm] y flujo de aire variable.</i>	59
<i>Figura 47. Curvas de coalescencia MIBC para velocidad de agitación 400 [rpm] y flujo de aire variable.</i>	60
<i>Figura 48. Curvas de coalescencia MIBC para velocidad de agitación 500 [rpm] y flujo de aire variable.</i>	60
<i>Figura 49. Curvas de coalescencia MIBC para velocidad de agitación 600 [rpm] y flujo de aire variable.</i>	61
<i>Figura 50. Curvas de coalescencia MIBC para flujo de aire nominal de 5 [lt/min] y velocidad de agitación variable.</i>	62
<i>Figura 51. Curvas de coalescencia MIBC para flujo de aire nominal de 10 [lt/min] y velocidad de agitación variable.</i>	62
<i>Figura 52. Curvas de coalescencia MIBC para flujo de aire nominal de 15 [lt/min] y velocidad de agitación variable.</i>	63
<i>Figura 53. Curvas de coalescencia NaCl para velocidad de agitación 300 [rpm] y flujo de aire variable.</i>	65
<i>Figura 54. Curvas de coalescencia NaCl para velocidad de agitación 400 [rpm] y flujo de aire variable.</i>	66
<i>Figura 55. Curvas de coalescencia NaCl para velocidad de agitación 500 [rpm] y flujo de aire variable.</i>	66
<i>Figura 56. Curvas de coalescencia NaCl para velocidad de agitación 600 [rpm] y flujo de aire variable.</i>	67
<i>Figura 57. Curvas de coalescencia NaCl para flujo de aire nominal de 5 [lt/min] y velocidad de agitación variable.</i>	67
<i>Figura 58. Curvas de coalescencia NaCl para flujo de aire nominal de 10 [lt/min] y velocidad de agitación variable.</i>	68
<i>Figura 59. Curvas de coalescencia NaCl para flujo de aire nominal de 15 [lt/min] y velocidad de agitación variable.</i>	68
<i>Figura 60. Resultados prueba 1 configuración heterodina en ortogonal.</i>	103
<i>Figura 61. Espectros de frecuencia prueba 1 configuración heterodina en ortogonal, sistemas con y sin burbujas.</i>	104
<i>Figura 62. Resultados prueba 1 configuración heterodina en LOS.</i>	105
<i>Figura 63. Espectros de frecuencia prueba 1 configuración heterodina en LOS, sistemas con y sin burbujas.</i>	106
<i>Figura 64. Resultados prueba 1 configuración heterodina inversa en ortogonal sistema sin burbujas.</i>	107
<i>Figura 65. Resultados prueba 1 configuración heterodina inversa en ortogonal.</i>	107
<i>Figura 66. Resultados prueba 2 configuración heterodina inversa en ortogonal sistema sin burbujas.</i>	108

Figura 67. Resultados prueba 2 configuración heterodina inversa en ortogonal.	109
Figura 68. Resultados prueba 3 configuración heterodina inversa en ortogonal sistema sin burbujas.	110
Figura 69. Resultados prueba 3 configuración heterodina inversa en ortogonal sistema con burbujas.	110
Figura 70. Curva calibración rotámetro.	111
Figura 71. Relación contenido de aire e intensidad se señal acústica.	112
Figura 72. Relación número de burbujas e intensidad de señal acústica.	112
Figura 73. Relación diámetro d10 e intensidad de señal acústica.	113
Figura 74. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	114
Figura 75. DTB para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	114
Figura 76. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	115
Figura 77. DTB para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	115
Figura 78. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	116
Figura 79. DTB para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	116
Figura 80. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	117
Figura 81. DTB para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	117
Figura 82. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	118
Figura 83. DTB para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	118
Figura 84. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	119
Figura 85. DTB para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	119
Figura 86. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	120
Figura 87. DTB para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	120
Figura 88. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	121
Figura 89. DTB para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).	121
Figura 90. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	122
Figura 91. DTB para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	122
Figura 92. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	123
Figura 93. DTB para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	123

Figura 94. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	124
Figura 95. DTB para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	124
Figura 96. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	125
Figura 97. DTB para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	125
Figura 98. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	126
Figura 99. DTB para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	126
Figura 100. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	127
Figura 101. DTB para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	127
Figura 102. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	128
Figura 103. DTB para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	128
Figura 104. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	129
Figura 105. DTB para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).	129
Figura 106. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).	130
Figura 107. DTB para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).	130
Figura 108. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).	131
Figura 109. DTB para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).	131
Figura 110. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).	132
Figura 111. DTB para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).	132
Figura 112. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).	133
Figura 113. DTB para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).	133
Figura 114. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).	134
Figura 115. DTB para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).	134
Figura 116. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).	135

<i>Figura 117. DTB para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).</i>	135
<i>Figura 118. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).</i>	136
<i>Figura 119. DTB para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).</i>	136
<i>Figura 120. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).</i>	137
<i>Figura 121. DTB para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).</i>	137
<i>Figura 122. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).</i>	138
<i>Figura 123. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).</i>	139
<i>Figura 124. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).</i>	139
<i>Figura 125. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).</i>	140
<i>Figura 126. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).</i>	140
<i>Figura 127. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).</i>	141
<i>Figura 128. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).</i>	141
<i>Figura 129. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).</i>	142

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2. Descripción de reactivo utilizado en desarrollo de técnica de medición por medios acústicos.</i>	34
<i>Tabla 3. Set de pruebas para modelo tamaño de burbuja - intensidad de señal.</i>	42
<i>Tabla 4. Descripción de reactivos utilizados para el estudio de curvas de coalescencia.</i>	56
<i>Tabla 5. Condiciones estudio coalescencia con MIBC.</i>	57
<i>Tabla 6. Condiciones estudio coalescencia con NaCl.</i>	57
<i>Tabla 7. Valores d_{32} para prueba en triplicado.</i>	58
<i>Tabla 8. Variabilidad asociada a CCC95 y d_{32} para pruebas de reproducibilidad.</i>	59
<i>Tabla 9. Error cuadrático medio para el ajuste de las curvas de coalescencia con MIBC.</i>	63
<i>Tabla 10. Valores CCC95 para campaña experimental con MIBC.</i>	64
<i>Tabla 11. Valores d_L para campaña experimental con MIBC.</i>	64
<i>Tabla 12. Requerimientos de NaCl para las distintas concentraciones.</i>	65
<i>Tabla 13. Error cuadrático medio para el ajuste de las curvas de coalescencia con NaCl.</i>	69
<i>Tabla 14. Valores CCC95 para campaña experimental con NaCl.</i>	69
<i>Tabla 15. Valores d_L para campaña experimental con NaCl.</i>	70
<i>Tabla 16. Resultado test ANOVA para parámetro CCC95 según variables operacionales. Pruebas con espumante MIBC.</i>	71
<i>Tabla 17. Resultado test ANOVA para parámetro CCC95 según variables operacionales. Pruebas con NaCl.</i>	71
<i>Tabla 18. Resultado test ANOVA para parámetro d_L según variables operacionales. Pruebas con espumante MIBC.</i>	71
<i>Tabla 19. Resultado test ANOVA para parámetro d_L según variables operacionales. Pruebas con NaCl.</i>	71
<i>Tabla 20. Condiciones prueba 1 configuración heterodina en ortogonal.</i>	102
<i>Tabla 21. Condiciones prueba 1 configuración heterodina en LOS.</i>	104
<i>Tabla 22. Condiciones prueba 1 configuración heterodina inversa en ortogonal.</i>	106
<i>Tabla 23. Condiciones prueba 2 configuración heterodina inversa en ortogonal.</i>	108
<i>Tabla 24. Condiciones prueba 3 configuración heterodina inversa en ortogonal.</i>	109

<i>Tabla 25. Resultados construcción del modelo: intensidad acústica y diámetro d_{32} medido por análisis de imágenes.</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 26. Resultados en sistema trifásico: intensidad acústica y d_{32} medido por análisis de imágenes.</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 27. Resultados reproducibilidad. Diámetro de Sauter calculado por métodos acústicos.</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 28. Tamaños d_{32} para pruebas realizadas con espumante MIBC.</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 29. Tamaños d_{32} para pruebas realizadas con NaCl.</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 30. Parámetros del modelo de Nisset para pruebas con espumante MIBC: diámetro límite (DI), A, B.</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 31. Parámetros del modelo de Nisset para pruebas con NaCl: diámetro límite (DI), A, B.</i>	<i>146</i>

1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En la industria minera la flotación es el proceso de concentración de minerales más utilizado en la actualidad. El proceso se vale de las características de hidrofóbicas de los distintos minerales para lograr una separación de manera selectiva. La concentración se realiza en equipos conocidos como celdas de flotación en las cuales se contacta la pulpa, compuesta por mineral previamente reducido de tamaño y agua, con aire inyectado en la celda en forma de burbujas. Al interior del equipo se realiza el mezclamiento de la pulpa mediante la agitación que produce un impeler, sirviendo además como método de generación de burbujas. Las partículas hidrofóbicas presentes en la pulpa tienen afinidad con las burbujas y tienden a adherirse a la superficie de estas y ascender con ellas para posteriormente ser colectadas en la parte superior de la celda en forma de concentrado de la especie de interés.

En el proceso de flotación participan tres distintas fases: sólido (partículas de mineral), líquido (agua) y gas (burbujas de aire), siendo por tanto un proceso heterogéneo. La fase gaseosa es de gran importancia para el desempeño del proceso que depende fuertemente de la cantidad y el tamaño de burbujas disponible para realizar la flotación. En este sentido es deseable un tamaño de burbujas lo más reducido posible ya que de esta manera la superficie de burbujas disponible para la flotación es mayor, considerando un flujo de aire constante en la celda de flotación.

El tamaño de burbujas en la celda de flotación se puede variar mediante el manejo de las variables operacionales, como son el flujo de aire inyectado y la velocidad de agitación de la celda. Sin embargo el tamaño de burbujas es controlado principalmente mediante la adición de reactivos químicos específicos, llamados espumantes. La capacidad de reducir el tamaño de burbuja por parte de los espumantes se debe a su propiedad prevenir la coalescencia, y adicionalmente generan una espuma estable capaz de contener el mineral captado por las burbujas. A pesar de la posibilidad de poder controlar el tamaño de burbujas mediante estos métodos, la ausencia de una técnica de medición de distribución de tamaños y/o un tamaño promedio de manera continua y confiable ha hecho que esta variable sea dejada en un segundo plano para fines de control y mejora del proceso. Contar con una técnica que sea capaz de entregar una medición de tamaños de burbuja de manera continua permitiría caracterizar de una manera segura el proceso de flotación y por otro lado controlar de mejor manera las variables que afectan la distribución de tamaños (flujo de aire, velocidad de agitación, cantidad y tipo de espumantes, etc.), entregando la posibilidad de

generar estrategias operacionales que reduzcan el tamaño de burbuja con fin de optimizar el desempeño de la flotación.

En la actualidad el tamaño de burbujas se mide por medio de técnicas de análisis de imágenes que son métodos discontinuos y usados solo con fines de diagnóstico operacional. Alternativamente a estas técnicas se propone utilizar las propiedades acústicas de las burbujas, probadas en diversas investigaciones, como medio para conocer los tamaños de burbujas generados en una celda de flotación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Generales

- Desarrollar una técnica que permita la medición de una distribución de tamaños de burbujas mediante el uso de señales de sonido y/o un indicador del tamaño característico de una distribución de tamaños online.
- Aplicación de la técnica de medición por medio de sonido para el estudio de curvas de coalescencia en medios bifásicos con MIBC y NaCl como agentes controladores del tamaño de burbujas y relacionar el punto de concentración crítica de coalescencia con las variables operacionales de la celda.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Establecer el comportamiento de una distribución de burbujas ante la exposición a una fuente de sonido mediante diversas disposiciones y configuraciones de instrumentos.
- Establecer el efecto que tiene la fase sólida en un sistema trifásico ante la exposición de una distribución de burbujas a una fuente de sonido externa.
- Aplicación de modelos de ajuste para curvas de coalescencia y obtención de valores utilizables para definir el desempeño de reactivos.

1.3 Alcances

El desarrollo de una técnica para medir tamaños de burbujas mediante el uso de señales acústicas abre una importante brecha en el proceso de flotación de minerales, y en cualquier proceso que las involucre. Principalmente, el gran aporte que puede rescatarse es la factibilidad de contar con una herramienta que permita la medición continua de los

tamaños de burbujas haciendo posible la incorporación de esta variable en el sistema de control del proceso. Conocer el tamaño de burbuja *online* en flotación de minerales significaría una mejora sustancial a la industria ya que se podría optimizar el proceso tomando decisiones operacionales orientadas a controlar la distribución de tamaño de burbujas buscando los valores deseados, y por lo tanto disponer dentro de la celda la superficie de burbujas necesaria para una correcta flotación.

Por otro lado la técnica se puede aplicar a otras áreas de investigación como se hace en este trabajo para caracterizar el desempeño de reactivos destinados a disminuir la coalescencia. Si bien es conocido el efecto que tienen los espumantes en la disminución de tamaño de burbujas, se carece de información acerca de la dependencia de estos reactivos con las variables operacionales involucradas en el sistema. Caracterizar el comportamiento de los reactivos supondría una oportunidad para optimizar la adición de éstos en el sistema, consumiendo solamente la cantidad necesaria en el proceso de flotación.

2 CAPÍTULO II: ANTECEDENTES

2.1 Definición de Variables Relativas al Aire en Flotación

La dispersión de la fase gaseosa en la celda se ve afectada por factores físicos como la velocidad y tipo de agitador, el flujo de gas y la geometría del reactor. Según lo expuesto por Gorain et al. [1], [2], [3], [4], [5] tanto los tamaños de burbujas producidos por el agitador, como la fracción de volumen de gas y la forma de la distribución de burbujas, en conjunto determinan la superficie de burbujas disponible para que las partículas de mineral sean flotadas.

2.1.1 Distribución de Tamaños de Burbujas

La distribución de tamaños de burbujas (DTB o BSD por sus siglas en inglés) da cuenta de la proporción que tiene cada una de las distintas clases de tamaños de burbujas dentro de la celda o dentro de un volumen de control.

Se definen los tamaños característicos d_{10} y d_{32} como aquellos tamaños que representan a la distribución de tamaños de burbujas. Las expresiones de estos tamaños son:

$$d_{10} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

d_i : diámetro equivalente esférico de burbuja.

n : tamaño de la muestra de burbujas.

El d_{32} también es conocido como diámetro de Sauter e incorpora información sobre el volumen y la superficie de burbujas de la muestra tomada. El d_{32} es el tamaño de la burbuja que conserva la relación entre volumen y superficie de la distribución completa.

Para distribuciones de tamaños estrechas, o que presentan poca varianza, el diámetro de Sauter se asemeja al diámetro medio. A medida que la

distribución presenta mayor varianza, el diámetro d_{32} se hace cada vez más distinto al diámetro d_{10} .

2.1.2 Contenido de Aire

El contenido de gas o *holdup* de gas (ϵ_g) corresponde a la fracción volumétrica de la celda que se encuentra ocupada por aire. El *holdup* de gas se expresa en porcentaje.

Se ha establecido una correlación entre la disminución del diámetro de Sauter en una celda de flotación y el aumento del contenido de aire en la celda [6]. Se sugiere que el aumento del contenido de aire al disminuir el tamaño d_{32} se relaciona con que las burbujas más pequeñas tienen una velocidad de ascenso más lenta, aumentando de esta forma el tiempo de residencia en la celda y por ende el volumen ocupado por burbujas.

2.1.3 Velocidad Superficial de Gas

La velocidad superficial de gas (J_g) corresponde al flujo volumétrico de gas inyectado a la celda dividido por el área transversal de ésta. Corresponde a un flujo de aire normalizado y se expresa como:

$$J_g = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

J_g : velocidad superficial de gas [cm/s].

Q : flujo volumétrico de gas [cm³/s].

A : área transversal efectiva de celda [cm²].

Se puede relacionar de manera directa el tamaño de burbuja d_{32} con la velocidad superficial de gas, es decir el diámetro de Sauter aumenta con incrementos de J_g [7], [8]. Nasset et al. proponen un modelo que relaciona el tamaño d_{32} con la velocidad superficial de gas según la siguiente ecuación:

$$d_{32} = d_0 + C \cdot J_g^n \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

d_0 : tamaño d_{32} mínimo que puede ser generado en el sistema.

C, n : parámetros que dependen del equipo de generación de burbuja y la química del sistema.

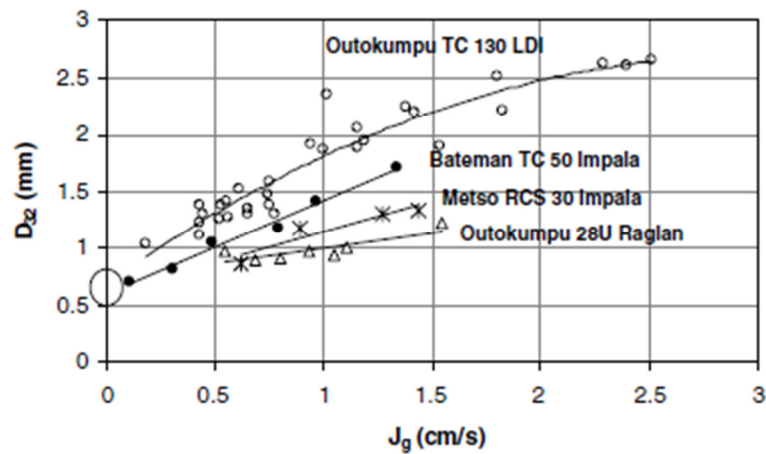


Figura 1. Diámetro d_{32} versus J_g para cuatro tipos distintos de celdas de flotación [8].

Aunque la relación ha sido probada como válida, requiere de un ajuste previo para encontrar los parámetros propios del sistema y no es posible aplicar los mismos valores para otras celdas de flotación.

2.1.4 Flujo Areal Superficial de Gas

El flujo areal superficial de gas (S_b) se define como la superficie de burbujas que atraviesan el área transversal de la celda de flotación por unidad de tiempo. Esta variable se puede calcular a partir del tamaño de burbujas (d_{32}) y la velocidad superficial de gas (J_g) de la siguiente manera:

$$S_b = \frac{6 J_g}{d_{32}} \quad \text{Ecuación 5}$$

El flujo areal superficial tiene unidades de [1/s].

Se ha establecido que la variable S_b es la que mejor se relaciona con la constante cinética de flotación según la siguiente relación [5]

$$k = P \cdot S_b \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

k : constante cinética de flotación.

P : parámetro que representa la flotabilidad del mineral.

El S_b no se puede medir directamente y requiere del conocimiento y de la correcta medición de otras variables de gas.

2.2 Medición de Distribución de Tamaños de Burbujas

Para medir la distribución de tamaños de burbujas se han desarrollado una serie de métodos, de los cuales el más usado en flotación de minerales es el analizador de burbujas por análisis de imágenes desarrollado en la Universidad McGill [9].

La técnica de la Universidad McGill se basa en la toma de una muestra de burbujas dentro de una cámara visualizadora en donde son fotografiadas con una cámara digital. Luego se utiliza un procedimiento de análisis de imágenes para medir el tamaño de las burbujas colectadas. El sistema comprende un tubo de muestreo unido a una cámara de visualización sellada, la cual es llenada con agua (generalmente agua de proceso) para permitir el ascenso de las burbujas. Las burbujas son expuestas a la toma de imágenes con la ayuda de iluminación externa la que se ubica en contra de la cámara digital. Se utiliza un ángulo de inclinación de 15° de la cámara visualizadora para esparcir las burbujas en una monocapa que limita el traslape y entrega un plano de foco sin ambigüedades [10]. Las burbujas son contadas y medidas en función de un tamaño de referencia conocido.

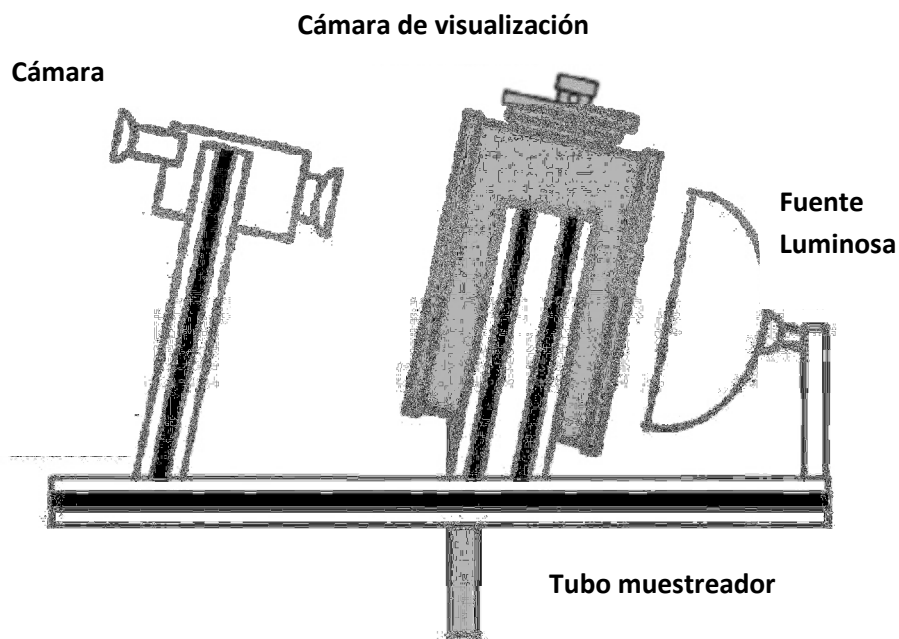


Figura 2. Esquema del analizador de burbujas de la Universidad McGill [10].

A partir de esta técnica se pueden estimar los valores de los tamaños d_{10} y d_{32} mediante las relaciones ya expuestas. Sin embargo, el método descrito posee una serie de limitaciones y sesgos [11], entre los cuales los de mayor importancia son:

- Segregación espacial de burbujas en el visor, en la cual la zona central de las imágenes presenta una densidad de burbujas mayor.
- Sesgo por muestreo temporal debido a que las burbujas tienen velocidades que dependen de su tamaño [12], las burbujas de tamaños más grandes (más rápidas) son submuestreadas.
- Sesgo por eliminación de clusters de burbujas, lo que genera una subestimación del tamaño de burbujas. El efecto está fuertemente ligado a la densidad de burbujas en la imagen y a la distribución de tamaños.

A pesar de ser la técnica más utilizada en la actualidad, el análisis de imágenes presenta inconvenientes que limitan su uso solo para fines de diagnóstico operacional. Las burbujas al contactarse con partículas de mineral y ascender a la cámara de visualización producen un aumento en la turbiedad en la zona de captura de imágenes, reduciendo la visibilidad y la calidad de las fotografías. La técnica se hace así discontinua, ya que cada cierto periodo de tiempo se debe cambiar el agua de la cámara de visualización. En adición, las imágenes recolectadas deben ser procesadas fuera de línea en un proceso engorroso que requiere de gran cantidad de tiempo, teniéndose entonces resultados cronológicamente distantes del momento de medición.

2.3 Burbujas Como Fuente de Sonido

2.3.1 Ondas Acústicas

La acústica puede ser definida como la generación, transmisión y recepción de energía en forma de ondas vibratorias y es generalmente considerada como el estudio del sonido y las vibraciones [13]. Las ondas acústicas a través de los gases, líquidos y sólidos son longitudinales, es decir, la energía de la onda es propagada mediante la vibración de partículas paralela a la dirección de la onda, produciendo una serie de regiones de alta densidad, alta presión (compresión) y regiones de baja densidad o baja presión. En sólidos, las ondas acústicas también pueden ser transversales en donde la dirección de la vibración de la partícula es perpendicular a la dirección de la onda. La baja viscosidad de los líquidos y gases permite que estas ondas transversales no ocurran en estas fases.

Las ondas acústicas pueden ser caracterizadas por su velocidad c , frecuencia f , y longitud de onda λ , las cuales se relacionan según:

$$c = \lambda f$$

Ecuación 7

La velocidad de fase de una onda acústica es una propiedad característica de un material y está relacionada con el módulo de compresibilidad del material B y la densidad del material ρ mediante:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Ecuación 8

Además de la frecuencia y la velocidad con la que viaja, una onda acústica puede también ser caracterizada por su amplitud A . La amplitud de una onda acústica varía con el tiempo y depende de la distancia a la fuente de sonido a la cual es medida. A medida que una onda acústica viaja a través de un medio su amplitud decaerá debido a la atenuación. La atenuación de una onda es causada por adsorción (conversión de energía acústica a otras formas de energía, principalmente calor) y dispersión. La dispersión ocurre en medios heterogéneos, en donde la onda acústica incide en una discontinuidad, la onda es dispersada otras direcciones aparte de la dirección de la onda incidente. La cantidad de dispersión dependerá del tamaño de la discontinuidad y la frecuencia de la onda acústica incidente. En el caso de un medio como los estudiados en flotación de minerales, la discontinuidad es representada por la distribución de burbujas en el medio líquido.

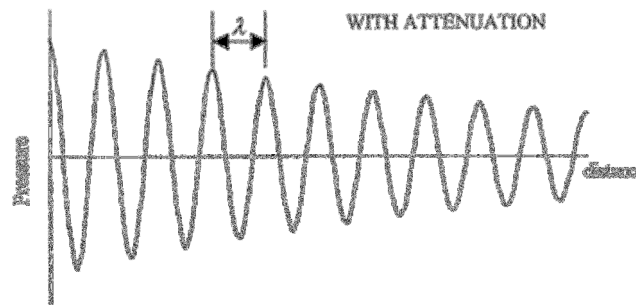


Figura 3. Propagación de una onda sonora con atenuación [13].

2.3.2 Detección y Procesamiento de Señales Sonoras

Con fin de establecer una conexión entre el tamaño de burbuja y las señales de audio, es necesario saber de antemano que existe una relación que vincula al tamaño de una burbuja con una única frecuencia de oscilación. Las señales de audio pueden ser procesadas mediante una herramienta matemática para obtener un resultado en el espectro de frecuencias, la transformada de Fourier [14].

La transformada de Fourier es una aplicación que relaciona una función en el dominio del tiempo con una función en el dominio de las frecuencias según la siguiente relación:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$F(\omega)$: función en el dominio de la frecuencia.

$f(t)$: función en el dominio del tiempo.

ω : frecuencia.

t : tiempo.

Con fines de cálculo se utiliza un algoritmo llamado transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés). La FFT corresponde a una versión discretizada de la transformada de Fourier y su utilización es fácil de manejar e implementar ya que este algoritmo viene incluido en softwares de cálculo matemático como MATLAB.

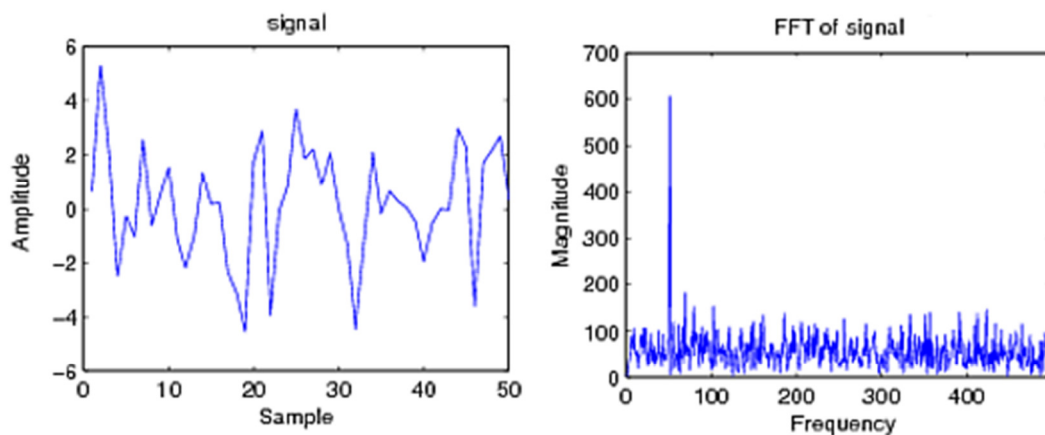


Figura 4. Ejemplo de aplicación FFT: a) señal en el tiempo; b) FFT aplicada a la señal en el tiempo.

La transformada de Fourier entrega el resultado de intensidad en valores de voltaje, por lo que deben ser traspasados a decibeles para su posterior procesamiento. La relación para pasar la intensidad a decibeles es [15]:

$$I = 20 \cdot \log \left(\frac{V_m}{V_r} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

I : intensidad en decibeles.

V_m : intensidad medida en voltaje.

V_r : intensidad de referencia en voltaje.

Para detectar las ondas de sonido en un medio líquido se utilizan equipos especializados conocidos como hidrófonos. También se utilizan transductores para la detección de señales de ultrasonido, los cuales además poseen la capacidad de actuar como transmisores de señales acústicas. El rango de intensidad y frecuencias es característico de cada instrumento por lo tanto se debe tener presente el tipo de medición a realizar para elegir correctamente los equipos.

2.3.3 Burbujas y Sonido

Las mediciones acústicas son potencialmente una herramienta muy útil de monitoreo para los procesos industriales, especialmente la flotación de minerales. Hay dos clases de métodos para monitorear un proceso acústicamente [13]:

- Acústica activa: medición del efecto de un proceso en una onda acústica transmitida (por lo general a ultrasonido de baja potencia).
- Acústica pasiva: la medición de emisiones acústicas creadas por el proceso mismo, por ejemplo el sonido en la generación de una burbuja.

A continuación se plantean las propiedades de las burbujas al ser expuestas a fuentes externas de sonido (ultrasonido) y también las características de generación sonora que poseen.

2.3.3.1 Relación de Minnaert

Las propiedades acústicas de las burbujas guardan relación con el tamaño de éstas y su frecuencia natural de oscilación. Esta relación fue encontrada por Minnaert y se establece según la siguiente ecuación [16]:

$$f = \frac{1}{\pi d} \left(\frac{3kP_0}{\rho} \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

f : frecuencia de oscilación [Hz].

d : diámetro de burbuja [mm].

ρ : densidad del líquido [gr/cm³].

P_0 : presión hidrostática a la que se encuentra sometida la burbuja.

k : factor que representa la relación entre calores específicos del gas.

Es posible considerar los valores de ρ , k , P_0 como constantes bajo ciertas condiciones por lo que la ecuación 11 se puede reducir a una relación simple entre la frecuencia de oscilación y el tamaño de la burbuja:

$$f = \frac{1}{\pi d} \cdot cte$$

Ecuación 12

Se infiere que la relación entre tamaño de burbuja y su correspondiente frecuencia de oscilación es de carácter inversa, es decir, para tamaños de burbujas mayores se tienen frecuencias de oscilación menores.

Se ha establecido que las burbujas oscilan a su frecuencia natural cuando reciben una fuerza de excitación. Esta fuerza puede encontrarse al momento de la generación de la burbuja y también al ser perturbadas por una fuente externa como ultrasonido [17].

Una burbuja oscilando puede ser modelada asumiendo un movimiento armónico simple en torno a un radio (tamaño de burbuja), generando pulsaciones en el medio circundante. Basado en este principio Leighton et al. logra demostrar la ecuación de Minnaert a partir de la energía cinética ejercida por la burbuja en resonancia en un líquido de características conocidas y el trabajo hecho por una burbuja de radio dado al comprimirse en un delta de su valor [18].

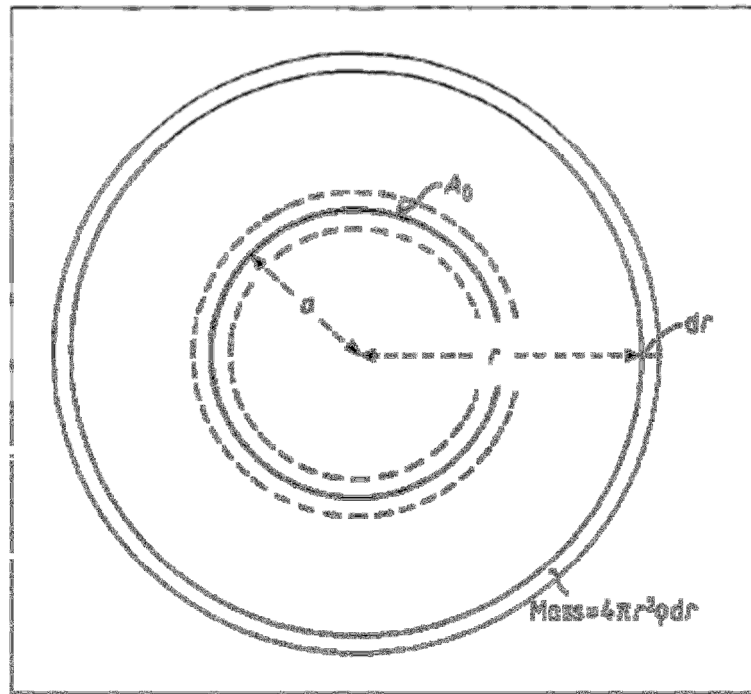


Figura 5. Modelación de una burbuja de radio a en un líquido de densidad ρ oscilando a amplitud A_0 [18].

2.3.3.2 Sonido en Generación de Burbujas

En el momento en que una burbuja es formada su superficie oscila o pulsa. Las pulsaciones de la superficie perturban el medio circundante (agua) y las ondas de sonido se dispersan en todas las direcciones [19].

En base a estas características de las burbujas junto con la ecuación de Minnaert, se han realizado estudios que comprueban la relación. En un trabajo realizado por Kracht et. al. [20] se generaron burbujas con un tubo capilar y se grabaron las señales de audio producidas en la formación de las burbujas por medio de un hidrófono. Luego se relacionaron los tamaños de las burbujas con las frecuencias de oscilación de cada una de ellas, cuyos valores ajustan según el modelo de Minnaert.

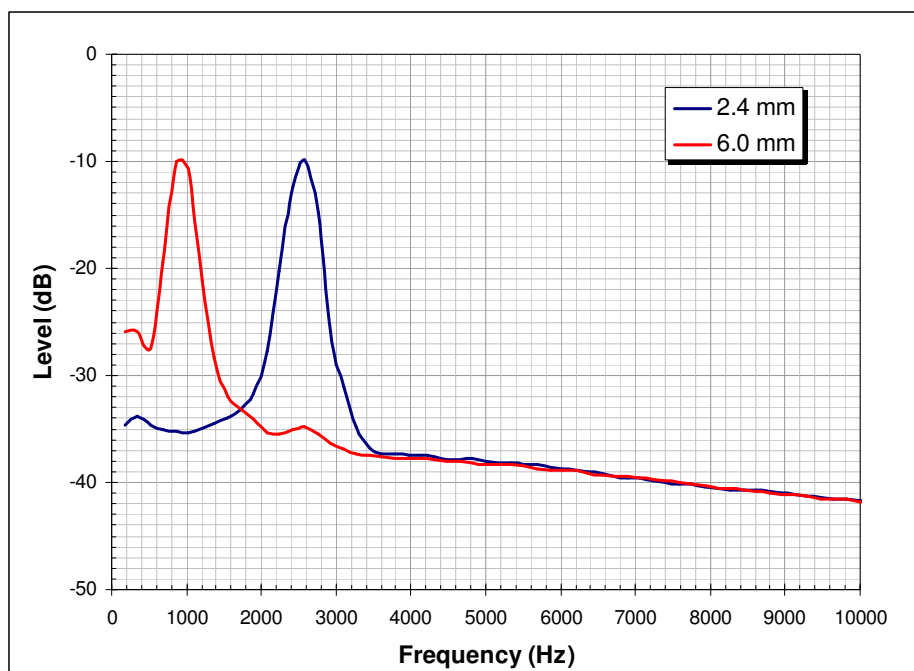


Figura 6. Análisis de frecuencias del sonido producido por la generación de burbujas de 2 tamaños [20].

También se ha estudiado el sonido generado por la coalescencia de 2 burbuja y se ha establecido que la frecuencia resultante de esta interacción corresponde a la frecuencia predicha por Minnaert [21] (para la burbuja recién formada).

El comportamiento de una burbuja recién generada puede asimilarse al de un oscilador armónico simple amortiguado. Las señales obtenidas para cada burbuja son de carácter sinusoidal y presentan un decaimiento exponencial al alejarse de la fuente emisora, por lo que la distancia de la fuente y el mecanismo de medición tiene una especial importancia en la obtención de los resultados.

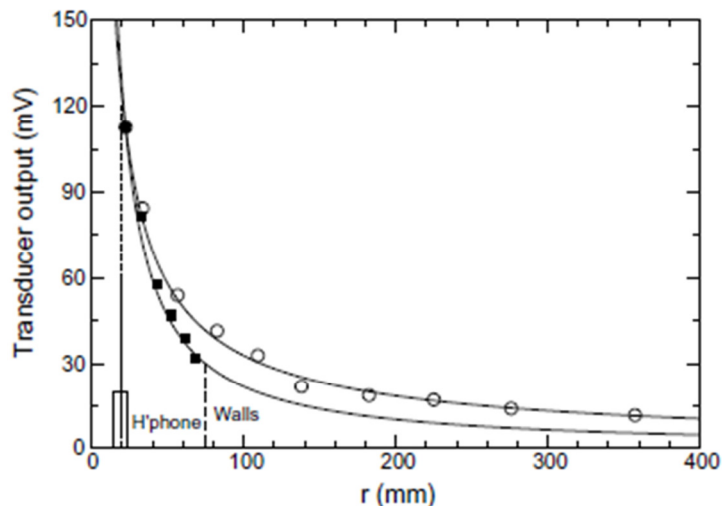


Figura 7. Amplitud de sonido en función de distancia horizontal al hidrófono (rectángulos) y distancia vertical al hidrófono (círculos) [21].

2.3.3.3 Sonido en Burbujas Excitadas por Fuentes Externas

Una burbuja de aire en un medio líquido puede ser excitada por una fuente externa para forzarla a oscilar en su frecuencia natural. Dicha fuente externa pueden ser ondas acústicas de ultrasonido, las cuales ejercen presión sobre la superficie de la burbuja obligándola a oscilar en una frecuencia que depende de su tamaño según la relación de Minnaert [17].

Las señales de ultrasonido se pueden aplicar mediante instrumentos especializados llamados transductores, los cuales son capaces de transmitir señales acústicas en frecuencias mayores a las audibles (más de 20 [kHz]). Estos instrumentos pueden cumplir una doble función, adicionalmente a la transmisión de señales pueden utilizarse como receptores de señales.

Se han formulado variados métodos que permiten detectar el tamaño de burbuja en base a la oscilación provocada por la excitación con señales de ultrasonido. Las distintas técnicas se aplican bajo ciertos parámetros conocidos y controlados utilizándose transductores ya sean como transmisores o como receptores de las ondas acústicas.

2.3.3.3.1 Detección por Medio de 2 Frecuencias de Excitación

Los métodos de detección de tamaños de burbujas por medio de 2 frecuencias de excitación que se han estudiado utilizan señales ya sean de carácter ultrasonoro o frecuencias audibles.

Un método de detección desarrollado por Buckey et al. [22] se basa en el hecho de que las burbujas actúan como mezcladores no lineales. Al volumen de burbujas medido se le aplica una señal de baja frecuencia o señal modulada (típicamente una frecuencia correspondiente al tamaño que se desea medir) y una señal de frecuencia mucho mayor en el rango de ultrasonido o señal portadora (2,25 [MHz] en la investigación). La señal de ultrasonido se mezcla con la baja señal en las burbujas y debido al comportamiento no lineal de éstas, al analizar el espectro de frecuencias, la señal de retorno de alta frecuencia contiene lóbulos laterales en la frecuencia portadora más y menos la frecuencia modulada, si es que existe una burbuja resonante en el volumen medido. Por lo tanto es posible identificar un tamaño ya que su frecuencia correspondiente presenta una mayor intensidad en el espectro de frecuencias.

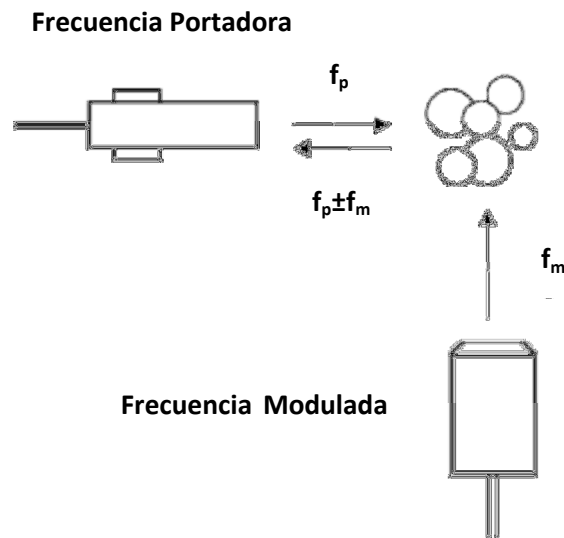


Figura 8. Esquema del método propuesto por Buckey et al. [22]: f_p es la frecuencia portadora; f_m es la frecuencia modulada.

Con la técnica descrita fue posible medir los tamaños de burbujas en un rango de 50 [μm] y 200 [μm]. Si bien en flotación de minerales es posible encontrar algunos de esos tamaños, la mayoría de las burbujas se presentan por sobre este rango (burbujas de hasta 3 [mm]).

Alternativamente al método anterior, se ha establecido que una burbuja al ser expuesta a 2 señales (sonido y ultrasonido) las pulsaciones no lineales de la burbuja acopla los 2 campos de audio y devuelve como resultado las siguientes frecuencias que pueden ser analizadas [23], [24]:

- Frecuencia fundamental
- Primer armónico
- Segundo armónico
- Tercer armónico

- $f_p \pm f_m$
- $f_p \pm f_m/2$

Los autores indican que las señales propuestas, en especial $f_p \pm f_m/2$, son indicadores menos ambiguos ya que la resonancia es más fácil de identificar. En la siguiente figura se observan los casos de la señal acoplada a frecuencia $f_p \pm f_m$ y a frecuencia $f_p \pm f_m/2$, en la que se ve una mejor respuesta para el segundo caso:

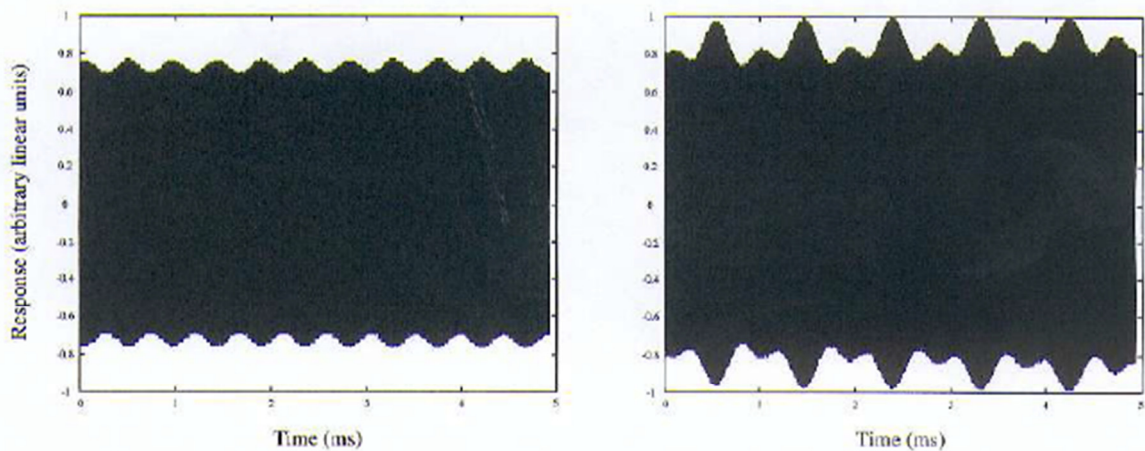


Figura 9. Acoplamiento de señales a frecuencias [23]: a) $f_p \pm f_m$; b) $f_p \pm f_m/2$.

Estos resultados son válidos para el caso de una burbuja aislada y por lo tanto no se tiene conocimiento de su efectividad al aplicarlo a una distribución de tamaños de burbujas ni del efecto que pueda tener la interacción entre ellas en el resultado final.

2.3.3.3.2 Detección por Medio de la Dispersión

Existen técnicas para la detección de burbujas que se basan en la resolución de modelos matemáticos. Estos métodos son inversos ya que no se mide directamente el tamaño de burbujas y se apoyan en el hecho de que las burbujas tienen un fuerte efecto en la propagación de las ondas acústicas.

Se han desarrollado relaciones matemáticas para la dispersión de ondas sonoras en fluidos con burbujas [25], las cuales se utilizan para obtener la atenuación (decaimiento en la intensidad) y la velocidad de fase (velocidad de la señal en el medio) para una población de burbujas dada. Por otro lado se ha establecido que la atenuación y la velocidad de fase son sensibles a la distribución de la población de burbujas [26]. En la resolución del problema se obtienen ecuaciones integrales para la densidad de población de burbujas en términos de la velocidad y la atenuación.

El inconveniente de estos métodos recae en su complejidad para resolverlos, teniendo que utilizarse una serie de herramientas matemáticas. La relación que se propone para encontrar la distribución de burbujas comprende unidades complejas por lo que su uso puede resultar engorroso al momento de una aplicación práctica:

$$\left(\frac{c_l}{c_M}\right)^2 = 1 + 4\pi c_l^2 \int_{a_1}^{a_2} \frac{aN(a)}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2ib\omega} da \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

c_M : velocidad del sonido en la mezcla líquido-burbujas.

c_l : velocidad del sonido en el líquido.

ω_0 : frecuencia natural característica de la burbuja como oscilador.

ω : frecuencia del sonido que se propaga en el medio.

b : constante de amortiguamiento de la burbuja como oscilador.

i : unidad imaginaria.

a : tamaño de burbuja.

$N(a)$: función de densidad de población de burbujas.

El procedimiento para estimar la densidad de burbujas y la velocidad del sonido buscadas se basa en un método iterativo como el mostrado en el siguiente esquema:

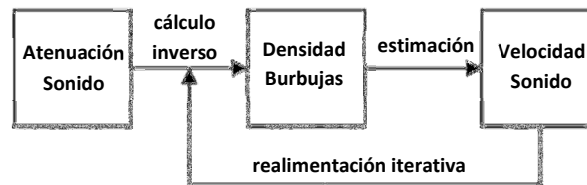


Figura 10. Procedimiento de resolución con método iterativo.

A pesar de la complejidad que implica este método, se ha utilizado para desarrollar un equipo llamado ABS Acoustic Bubble Spectrometer [27], el cual consiste en un arreglo de 3 pares de transductores que miden en un rango de frecuencias distintas cada uno.

El rango de tamaños medido con esta técnica es pequeño en comparación a los tamaños presentes en la flotación de minerales, siendo validado para diámetros hasta 200 [μm]. Sin embargo es rescatable el hecho de que la presencia de una distribución de burbujas genera una dispersión de la señal acústica emitida, ya que las burbujas representan una discontinuidad en el medio líquido.

Se ha visto que en la actualidad no existe una técnica de determinación de tamaños de burbujas por medios acústicos válidamente aplicable a la

flotación ya que en este proceso se tiene un gran número de burbujas y de tamaños mayores a los explorados en trabajos anteriores.

2.4 Generación de Distribuciones de Tamaños de Burbujas

El resultado de la distribución de tamaño de burbuja observado en una celda de flotación de cualquier tipo de diseño es el resultado de los procesos de ruptura y de coalescencia de burbujas [8]. La ruptura es considerada un proceso primario de generación, mientras que la coalescencia de burbujas es un proceso secundario de generación.

2.4.1 Ruptura de Burbujas

La ruptura depende principalmente de las condiciones operacionales del equipo en que se generan las distribuciones de tamaños de burbujas, que corresponden a las celdas de flotación. Las variables que más influyen en el proceso primario de formación son la velocidad de agitación y el flujo de aire inyectado en la celda. En diversos experimentos se ha establecido que la velocidad de agitación (o velocidad del impeler) provoca una disminución del tamaño medio de burbujas en la celda [1], [28]. También se señala la dependencia del tamaño de burbujas con el flujo de aire [1], [29], aumentando el diámetro medio ante la inyección de más aire en la celda y adicionalmente se observa que las distribuciones de tamaño son más anchas al aumentar el flujo de aire.

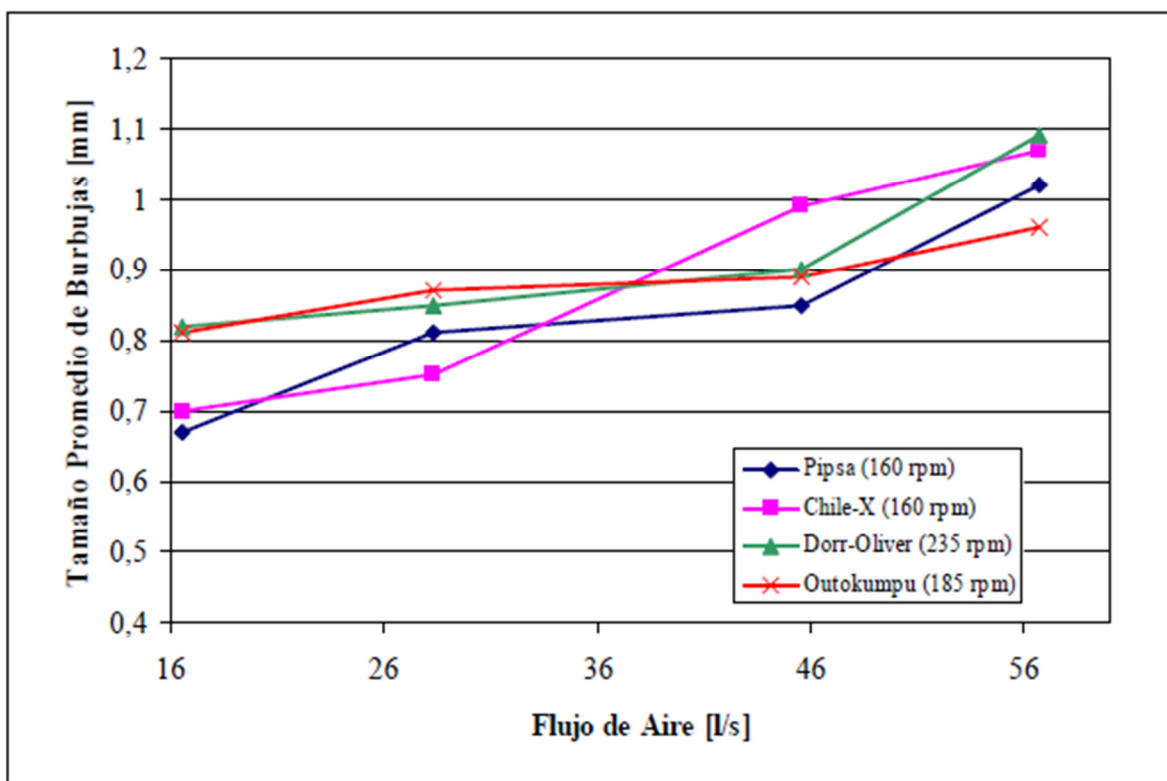


Figura 11. Tamaños de burbujas en función del flujo de aire para distintos tipos de celda [30].

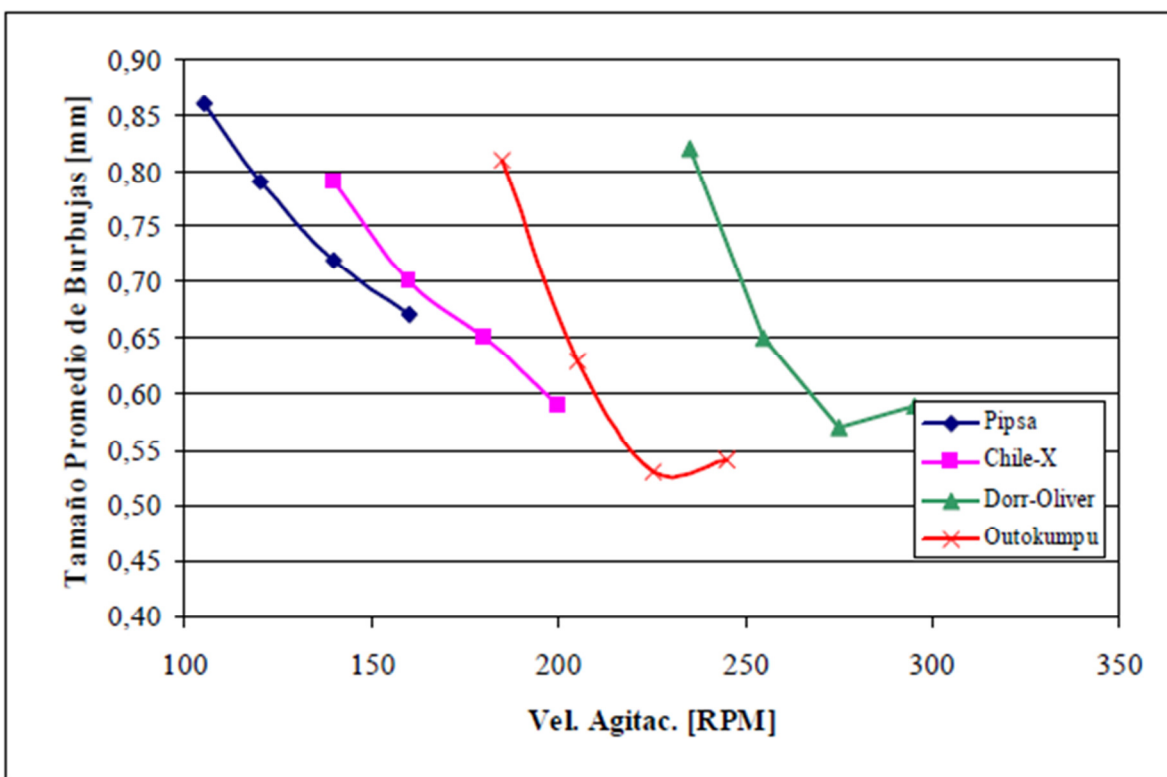


Figura 12. Tamaños de burbujas en función de la velocidad de agitación para distintos tipos de celda [30].

2.4.2 Coalescencia de Burbujas

Los procesos secundarios de generación de burbujas, o coalescencia, dependen de la interacción burbuja-burbuja y son controlados mediante la adición de reactivos químicos llamados espumantes.

2.4.2.1 Espumantes y Concentración Crítica de Coalescencia

En un sistema en ausencia de agentes que inhiban la coalescencia se obtienen distribuciones de tamaños de burbujas de carácter bimodal [31]. Los espumantes, reactivos que contribuyen a prevenir la coalescencia de burbujas disminuyendo la tensión superficial del líquido, tienen como efecto una evolución de la DTB desde una forma bimodal a una distribución en torno a un valor (semejante a una distribución normal).

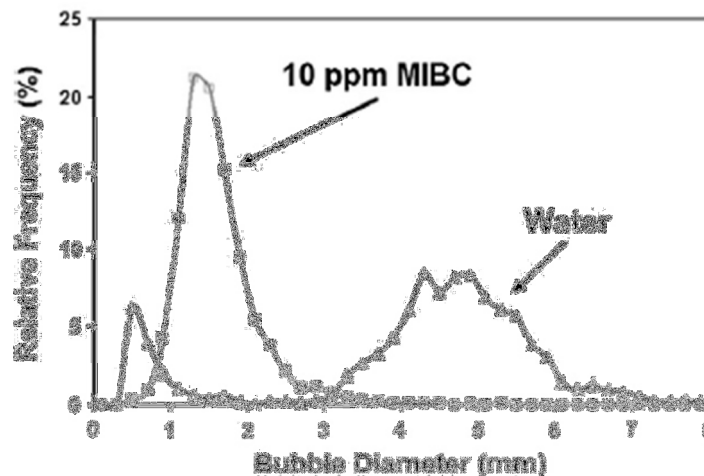


Figura 13. Efecto de la adición de espumante en la forma de la DTB [31].

Alternativamente a la utilización de espumantes, se ha demostrado que las sales como NaCl , CaCl_2 , Na_2SO_4 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ provocan cambios similares en las distribuciones de tamaños de burbujas al aumentar su concentración [32]. Particularmente, al aumentar la concentración de NaCl el tamaño de burbujas disminuye, ya que al igual que los espumantes contribuye a prevenir la coalescencia. Distintos datos obtenidos indican que aproximadamente una concentración de 8 ppm de MIBC corresponde a una concentración de 0,4 M de NaCl [32], [33].

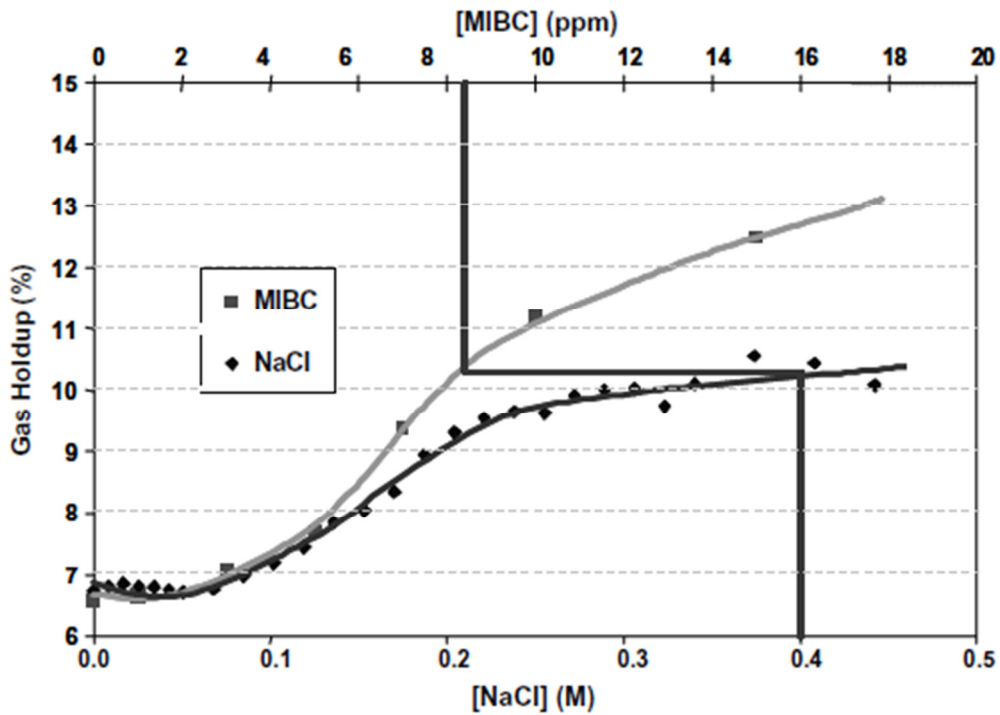


Figura 14. Equivalencia entre concentración de MIBC y concentración de NaCl [32].

En diversos trabajos se ha establecido la existencia de una concentración para la cual los espumantes producen una coalescencia mínima [34], [35]. La concentración a la cual se logra un tamaño de burbuja medio prácticamente constante se denomina concentración crítica de coalescencia (CCC). A partir del punto CCC una mayor adición de reactivos no tiene un efecto significativo debido a que ya se ha alcanzado el punto en que la coalescencia de burbujas es casi nula.

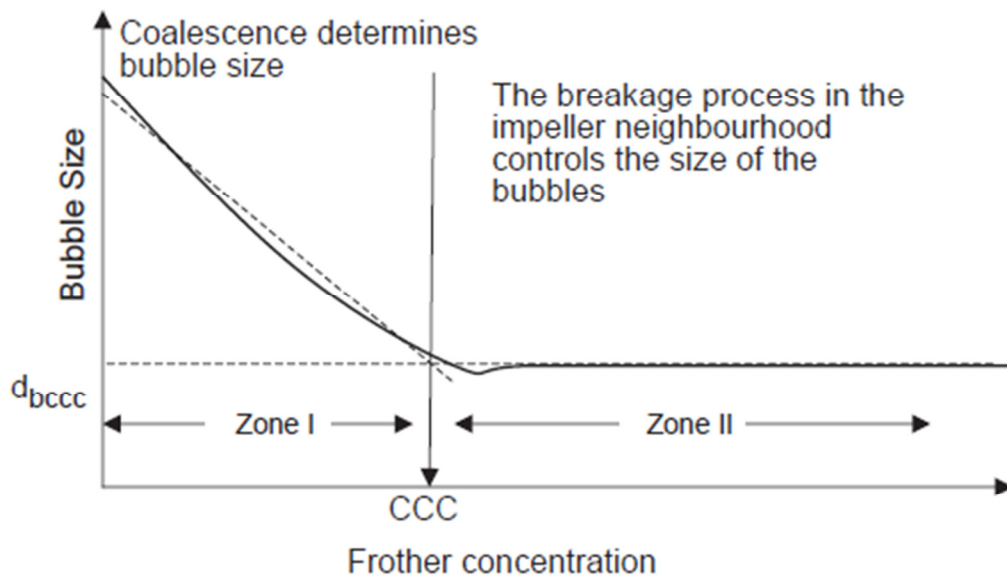


Figura 15. Forma estándar de curvas de coalescencia y método de obtención de CCC de manera gráfica [34].

Según la literatura disponible se distinguen 2 zonas en las curvas de coalescencia: una zona en la que el tamaño de burbujas es controlado por la coalescencia y una zona en donde el tamaño de burbujas está controlado por la ruptura. La región en la cual la DTB es controlada por los procesos de generación primarios se encuentra a valores de concentración de espumante más allá de la CCC.

Grau et al. [34] proponen un método para obtener el punto CCC de manera gráfica (ver figura 15). El valor buscado se obtiene mediante la intersección de la recta horizontal de la curva de coalescencia a altas concentraciones de espumante con una recta que ajusta a la pendiente para bajas concentraciones de espumante.

Se ha demostrado que todos los espumantes producen una tendencia similar entre coalescencia y d_{32} , diferenciándose sólo en su CCC [36]. La tendencia mostrada en la disminución del tamaño d_{32} es de carácter exponencial. Nasset et al. [37] logran ajustar una curva a los valores de coalescencia y tamaño de burbuja mediante el siguiente modelo:

$$d_{32} = d_l + (d_0 - d_l) \cdot \exp(-B \cdot C) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

d_l : tamaño mínimo producido por el sistema (d_{32} a concentraciones más allá de CCC).

d_0 : tamaño d_{32} para el sistema sin espumante.

B : constante de decaimiento que depende del tipo de espumante.

C : concentración de espumante.

Esta relación se puede normalizar en función de su CCC95 que corresponde al valor de concentración de espumante a la cual se ha reducido el tamaño de burbuja d_{32} sin espumante a un 95% [38]. La normalización de las curvas de coalescencia demuestra que la forma de la curva es la misma para diferentes espumantes [39]:

$$d_{32} = d_l + (d_0 - d_l) \cdot \exp\left(-b \cdot \frac{C}{CCC95}\right) \quad \text{Ecuación 15}$$

A partir de estas ecuaciones es posible obtener valores de interés para distintas concentraciones, por ejemplo CCC50, CCC75, etc.

Grau et al. [34] sugieren que la concentración crítica de coalescencia depende del tipo de espumante. Por otra parte Nasset et al. [38] exploraron la dependencia del CCC95 con variables operativas del equipo de flotación, utilizando un sistema con espumante DowFroth250. Los autores señalan que al aumentar la velocidad superficial de gas (J_g) se produce incremento en el valor de CCC95 y en el tamaño mínimo límite d_l , sin embargo no señalan el

grado de variabilidad de estos datos por lo que se desconoce si estos cambios son significativos a escala global.

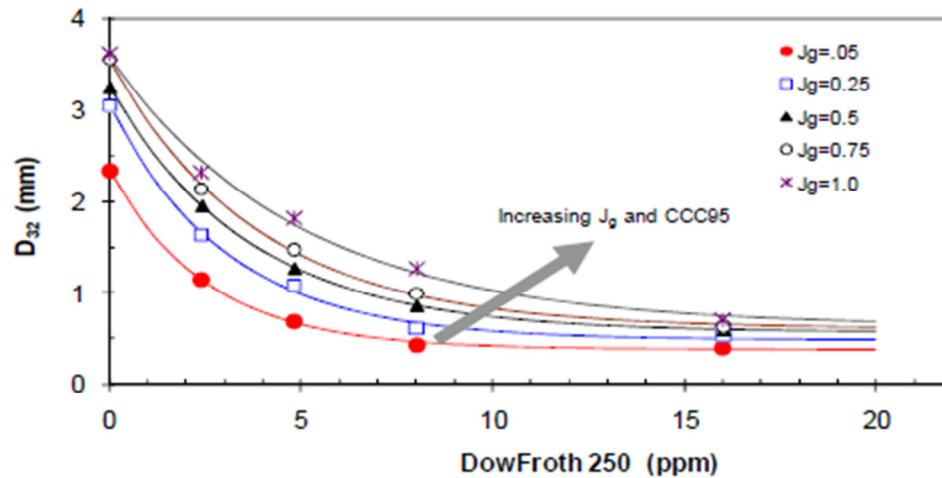


Figura 16. Efecto de aumento de J_g en CCC95 [38].

La proposición de estas relaciones en la evolución de la CCC abre una brecha para explorar el comportamiento de los espumantes en distintas condiciones y comprender de mejor manera su conducta bajo ciertos parámetros operacionales, pudiéndose utilizar esta información en la optimización del proceso en flotación de minerales o en la elección de reactivos a utilizar.

2.4.2.2 Concentración Crítica de Coalescencia Local

En un trabajo previo realizado por Kracht et al. [33] se estudió el desempeño de reactivos en la prevención de la coalescencia. En el estudio se utilizaron un grupo de alcoholes y de sales que poseen características preventivas de esta propiedad. La técnica que se utilizó para medir la coalescencia de burbujas consiste en un tubo capilar para la generación de burbujas mediante la inyección de aire. A medida que el flujo de aire aumenta la frecuencia de burbujas generadas crece y eventualmente se produce contacto entre ellas provocando la coalescencia. La coalescencia de burbujas es identificada mediante mediciones acústicas.

Esta técnica descrita requiere de un sistema sin agitación lo que implica una condición en ausencia de ruptura de burbujas. Debido a esta característica los valores encontrados para la concentración crítica de coalescencia son locales y son llamados *l*-CCC para diferenciarlos de la CCC de un sistema típico con agitación.

Al estudiar el espumante MIBC se aprecia una *I-CCC* en aumento hasta concentraciones de 30 [ppm], no alcanzándose el valor estable en estos experimentos. Por otra parte, al realizar el mismo estudio utilizando distintas sales como agentes, en específico NaCl, se encuentra que difiere del comportamiento mostrado por el espumante MIBC. Se postula que el NaCl muestra una zona de transición entre la no-coalescencia y la coalescencia, siendo esta una región de coalescencia esporádica o de prevención parcial de coalescencia. Se menciona que en esta zona intermedia los eventos de prevención de coalescencia parecen ser de carácter aleatorio.

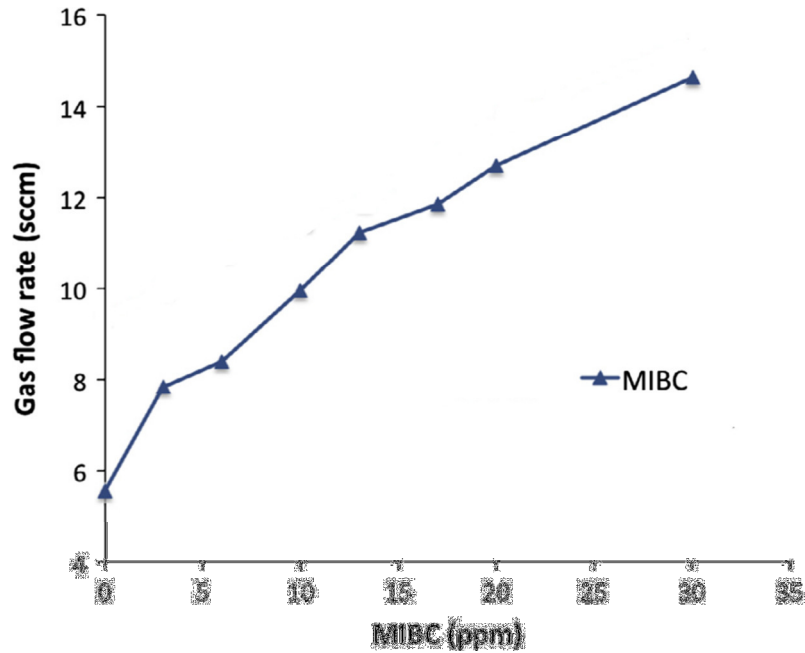


Figura 17. Curva de prevención de coalescencia (*I-CCC*) para MIBC [33].

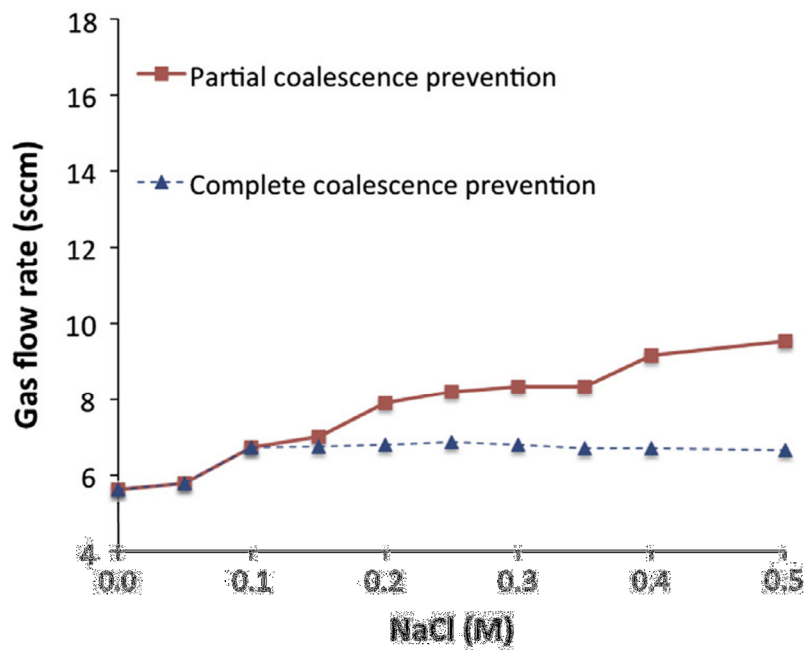


Figura 18. Curva de prevención de coalescencia (I-CCC) para NaCl: prevención parcial y prevención completa [33].

Estos resultados resultan interesantes para poder proyectar los experimentos destinados a construir las curvas de coalescencia en una celda de flotación de laboratorio, en donde además de tener la presencia de coalescencia de burbujas se cuenta con el proceso de ruptura de estas, determinados por la elección de variables operacionales a utilizar.

En los capítulos posteriores se presenta el trabajo realizado, el cual se divide en 2 grandes partes para facilitar el entendimiento y separar el desarrollo de la técnica de medición por medios acústicos y la aplicación de la misma a una investigación. Finalmente se presenta un capítulo de conclusiones abarcando toda la investigación realizada.

PARTE I: DESARROLLO DE UNA TÉCNICA DE MEDICIÓN POR MEDIOS ACÚSTICOS

3 CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE TÉCNICA ACÚSTICA

A continuación se expondrán los equipos utilizados en las mediciones de tamaños de burbujas ya sea por medios acústicos o por método de análisis de imágenes, los equipos de generación de burbujas, y también las configuraciones utilizadas para medir por medios acústicos.

3.1 Equipos y Materiales

3.1.1 Generación de Burbujas

Para la generación de burbujas se utilizaron 2 tipos de instrumentos dependiendo de la necesidad de generar una distribución completa de tamaños o una distribución monotamaño:

- Celda de flotación de laboratorio: permite generar una distribución de tamaños de burbujas completa que puede ser controlada mediante el manejo de la velocidad de agitación y el flujo de aire inyectado.
- Tubos capilares: permite generar una distribución monotamaños de burbujas. El tamaño generado depende principalmente del tamaño de la abertura del tubo capilar.

La generación por medio de tubos capilares se realiza inyectando aire a una presión adecuada en unos tubos de vidrio con una pequeña abertura en su interior, lo que permite la generación de burbujas en forma continua y de un tamaño constante.



Figura 19. Tubos capilares utilizados para la generación de monotamaños.

La generación de la distribución de tamaños de burbujas se realiza mediante la utilización de una celda de flotación de laboratorio. La máquina utilizada es una celda de flotación batch Labtech-ESSA, que cuenta con un

rotámetro para control de flujo de aire, graduado entre 5 y 25 [lt/min] y de un sensor digital para medir la velocidad de agitación, con capacidad entre 0 y 1200 [rpm]. Para el caso de las pruebas realizadas no se utilizaron valores de agitación mayores a 600 [rpm] ya que a partir de este valor la agitación se vuelve muy violenta complicando las pruebas. La celda utilizada tiene una capacidad de 5 litros de volumen útil y un área de celda de 397 [cm²]. El impeler correspondiente a esta celda tiene un diámetro de 10,7 [cm] y un alto de 2,7 [cm].



Figura 20. Celda de flotación laboratorio Labtech-ESSA.

3.1.2 Medición por Medios Acústicos

Los componentes del equipo de medición por medios acústicos incluyen instrumentos electrónicos y también instrumentos mecánicos.

3.1.2.1 Cámara de Medición

Recipiente de acrílico de dimensiones 35 [cm] de alto, 24 [cm] de largo y 20 [cm] de ancho, sellado al ambiente por donde circulan las burbujas. Posee receptáculos en los cuales se pueden ubicar transductores de ultrasonido y un tweeter en dos posiciones distintas, a 90° y en línea de vista.



Figura 21. Cámara de medición de acrílico.

La cámara de medición permite el ingreso de burbujas generadas en máquinas externas, tomando muestras de ellas de manera continua. En la parte inferior posee una abertura de $\frac{1}{2}$ pulgada que permite la conexión con un tubo muestreador, o un manguera, de longitud adecuada para permitir la medición en el estanque externo de generación de burbujas. En la parte superior posee una abertura del mismo diámetro que permite la succión, por medio de una bomba peristáltica que se conecta con mangueras, la cual se realiza de manera continua para extraer el contenido de aire almacenado debido a la acumulación de burbujas.

Este instrumento está pensado en un tipo de medición alejado de la fuente de generación de burbujas con fin de evitar captar el sonido producido por este proceso y teniendo de este modo una recepción más limpia de la señal acústica que interactúa con la señal.

3.1.2.2 Transductores

Transductores tipo Reson TC3027. Este instrumento que puede actuar como emisor y receptor de señales acústicas. Uno o dos de estos equipos se utilizan dependiendo de la configuración de la prueba. Funcionan en una banda de frecuencias de $1 \text{ [MHz]} \pm 200 \text{ [kHz]}$.

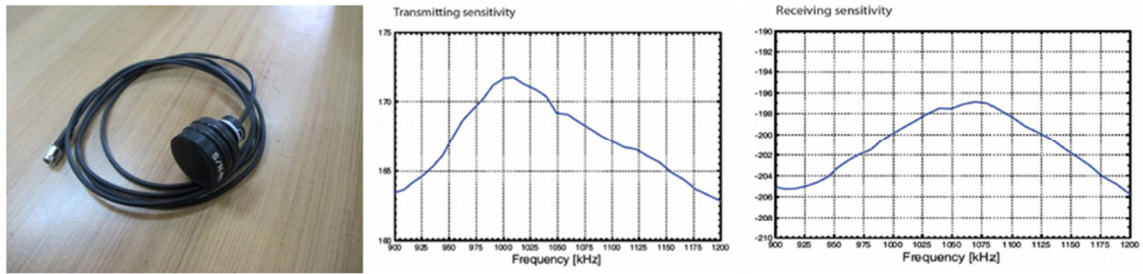


Figura 22. Transductor Reson TC3027 con sus respuestas en frecuencia.

3.1.2.3 Bomba Peristáltica

Una bomba peristáltica Masterflex de velocidad variable se utiliza para extraer burbujas de su lugar de generación y hacerlas pasar por el estanque de acrílico. La velocidad utilizada, la cual asegura una extracción de burbujas sin acumulación dentro de la cámara de medición, es de 0,53 [lt/min].



Figura 23. Bomba peristáltica con mangueras flexibles.

3.1.2.4 Fuente de Poder

Se utiliza una fuente de poder para suplir con energía a los componentes electrónicos del prototipo.

3.1.2.5 Generador de Funciones

Se utilizan 2 generadores de funciones de hasta 3 MHz para generar las señales de excitación que se aplican al sistema. Típicamente en todos los experimentos se utiliza una señal portadora en torno a 1 [MHz] y alternativamente una segunda señal en torno al rango de audio-ultrasonido.



Figura 24. Fuente de poder y generados de funciones.

3.1.2.6 Buffers de Carrier y Audio

Módulo construido en protoboard impreso que cuenta con dos amplificadores:

- Amplificador de señal portadora en torno a $1 \text{ [MHz]} \pm 200 \text{ [kHz]}$. Este amplificador posee dos entradas para sumar dos señales portadoras en modo AC.
- Amplificador de señal de audio-ultrasonido.

3.1.2.7 Modulador AM

La modulación de amplitud (AM) es el proceso de cambiar la amplitud de una señal portadora de frecuencia relativamente alta de acuerdo con la amplitud de la señal modulante (información). Con la modulación AM la información se imprime sobre la señal portadora en la forma de cambios de amplitud. El efecto obtenido es trasladar la señal modulante en el dominio de la frecuencia para reflejarse simétricamente alrededor de la frecuencia de la señal portadora.

Se construyó un instrumento construido en protoboard que permite modular una señal portadora en el rango de 1 [MHz] por una señal de frecuencia más baja en el rango audio-ultrasonido.

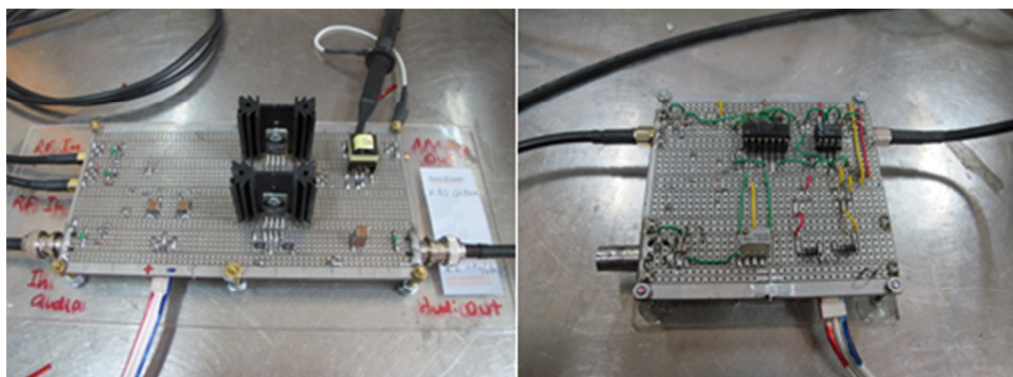


Figura 25. Buffer carrier audio y modulador AM.

3.1.2.8 Filtro y Amplificador de Audio-Ultrasonido para salida del Mixer

Módulo construido en protoboard para bloquear residuos de señal portadora y bloquear la banda de frecuencias bajas de audio. Este módulo permite aislar el ruido del tipo sala de máquinas y residuos de señal portadora que podrían dañar las señales de entrada de la tarjeta de adquisición de datos.

3.1.2.9 Filtro Pasa Altos de Carrier con Amplificador para salida del transductor

Módulo construido en protoboard que elimina los residuos de audio-ultrasonido a la salida del transductor receptor Reson TC3027 y selecciona la banda en torno a la portadora de 1 [MHz] con un ancho de banda holgado.

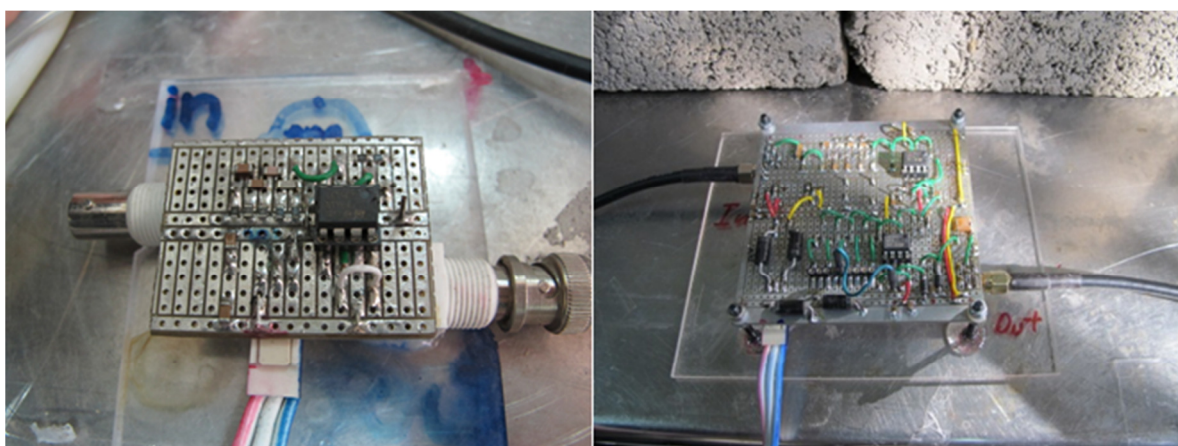


Figura 26. Filtros de señales.

3.1.2.10 Mixer

El mixer actúa como un multiplicador pasivo que permite desplazar las señales adquiridas en torno a frecuencias muy altas de 1 [MHz] a un rango audible.



Figura 27. Multiplicador de señales (mixer).

3.1.2.11 Hidrófono y Amplificador de Carga

Hidrófono Brüel & Kjaer tipo 8103 omnidireccional con amplificador de carga compatible Brüel & Kjaer tipo 2635. Cubre hasta un rango de frecuencias de 100 [kHz].



Figura 28. Amplificador de carga Brüel & Kjaer.

3.1.2.12 Tarjeta de Adquisición de Datos

Tarjeta National Instruments utilizada para la recolección de datos. Se conecta directamente a un PC donde se procesa los datos adquiridos y puede tomar hasta 400.000 muestras por segundo. La tarjeta también tiene la facultad de generar señales las cuales deben ser previamente programadas en un computador.



Figura 29. Tarjeta de adquisición de datos NI.

3.1.3 Reactivos Utilizados

Se utilizó el siguiente reactivo para controlar los tamaños de burbujas mediante la disminución de la coalescencia:

Tabla 1. Descripción de reactivo utilizado en desarrollo de técnica de medición por medios acústicos.

REACTIVO	CARACTERÍSTICAS	
AEROFROTH 70	Composición	Metil Isobutil Carbinol, mezcla de alcohol alifático, butanol
	Gravedad Específica	0,854-0,95 a 25°C
	Proveedor	Cytec Chile

3.2 Posibles Configuraciones de Medición por Medios Acústicos

Se consideran 3 configuraciones para medir por medios acústicos, cada una con distintas disposiciones espaciales, estas son: resonancia heterodina, resonancia heterodina inversa y una modificación del esquema de resonancia heterodina.

De estas configuraciones la que presenta resultados satisfactorios es la resonancia heterodina modificada. Las 2 configuraciones restantes fueron descartadas debido a que la excitación aplicada no logra respuestas de las burbujas y por lo tanto no es factible relacionar el tamaño de burbuja con emisiones acústicas (ver anexos).

A continuación se presentan los esquemas de las 3 configuraciones probadas, pero teniendo en consideración que las pruebas y resultados presentados posteriormente se realizan bajo la configuración modificada de resonancia heterodina.

3.2.1 Resonancia Heterodina

En esta configuración se excitan burbujas con una señal portadora de 1 [MHz] modulada en AM Portadora suprimida por una señal de audio enviada desde un generador de funciones o por una señal generada desde un archivo tipo *.wav. Alternativamente se puede aplicar una segunda señal sin modular a $1 + \Delta f$ [MHz], donde Δf es la frecuencia de excitación de interés. Como emisor se utiliza un transductor Reson TC3027 y las señales resultantes de la excitación de las burbujas son recibidas mediante un hidrófono en el rango audible de frecuencias y amplificadas en un amplificador de carga Brüel & Kjaer.

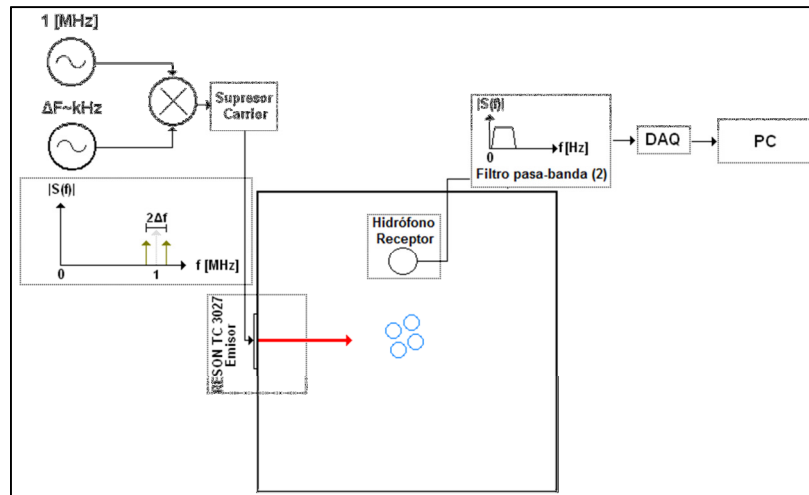


Figura 30. Diagrama esquemático configuración resonancia heterodina.

3.2.2 Resonancia Heterodina Inversa

En esta configuración las burbujas son excitadas con una señal portadora de 1 [MHz] sin modulación en un transductor de ultrasonido operando como emisor y una señal de audio emitida desde un tweeter. La señal resultante al excitar las burbujas es recibida por otro transductor de ultrasonido Reson TC3027 que actúa en modo receptor.

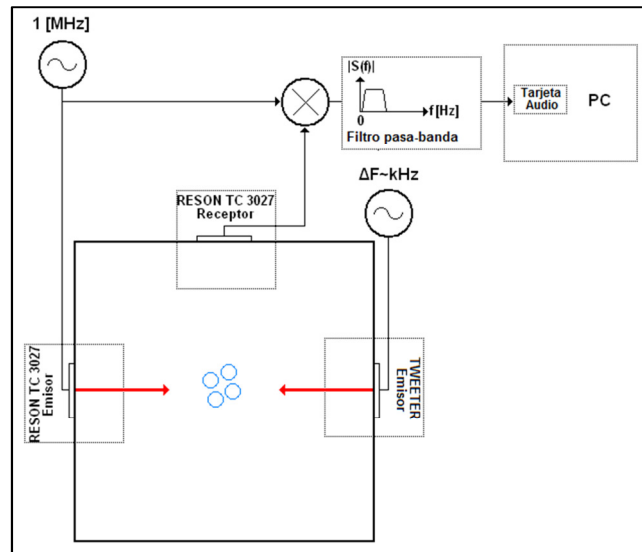


Figura 31. Diagrama esquemático configuración resonancia heterodina inversa.

3.2.3 Modificación de Esquema Resonancia Heterodina

Esta configuración es una modificación del esquema de resonancia heterodina en la cual la principal innovación es la forma de recibir las señales. Se excitan burbujas con una señal portadora de 1 [MHz] modulada en AM portadora suprimida por una señal de audio generada desde un archivo tipo *.wav. Como emisor y receptor se utilizan dos transductores Reson TC3027 ubicados a 90°. Las señales emitidas en el rango de ultrasonido son captadas después de interactuar con las burbujas en el mismo rango en torno a 1 [MHz].

El transductor acústico permite perturbar las burbujas con una fuente de ultrasonido a una frecuencia dada, para luego capturar la señal de respuesta con un transductor receptor y posteriormente demodular esta señal, y finalmente establecer una relación tamaño-intensidad recibida.

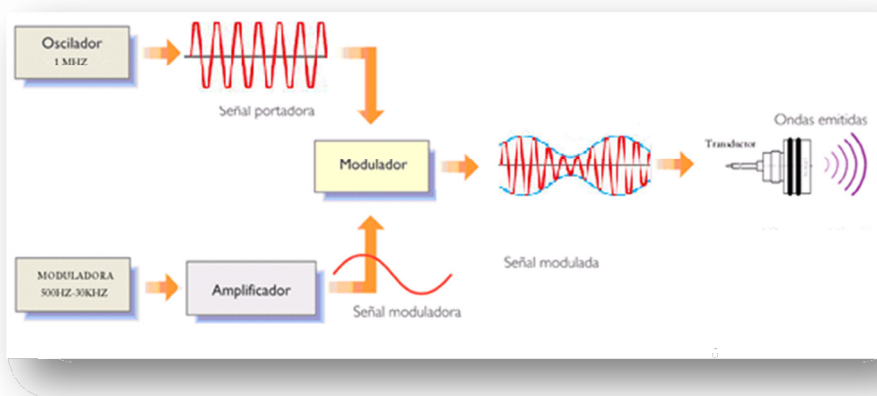


Figura 32. Esquema proceso de generación de señal que excita burbujas.

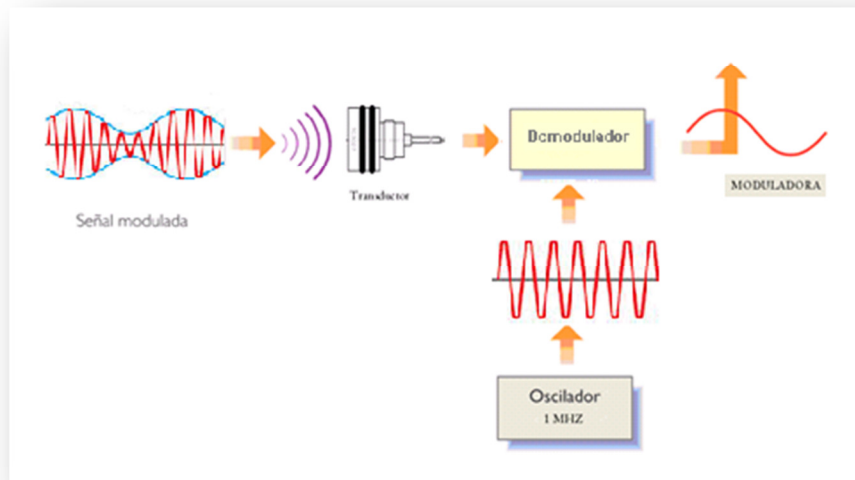


Figura 33. Esquema proceso de demodulación.

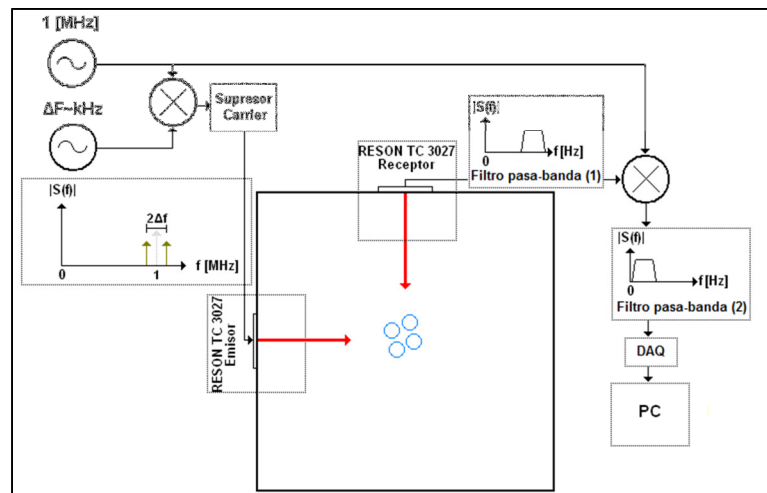


Figura 34. Diagrama esquemático configuración modificada de resonancia heterodina.

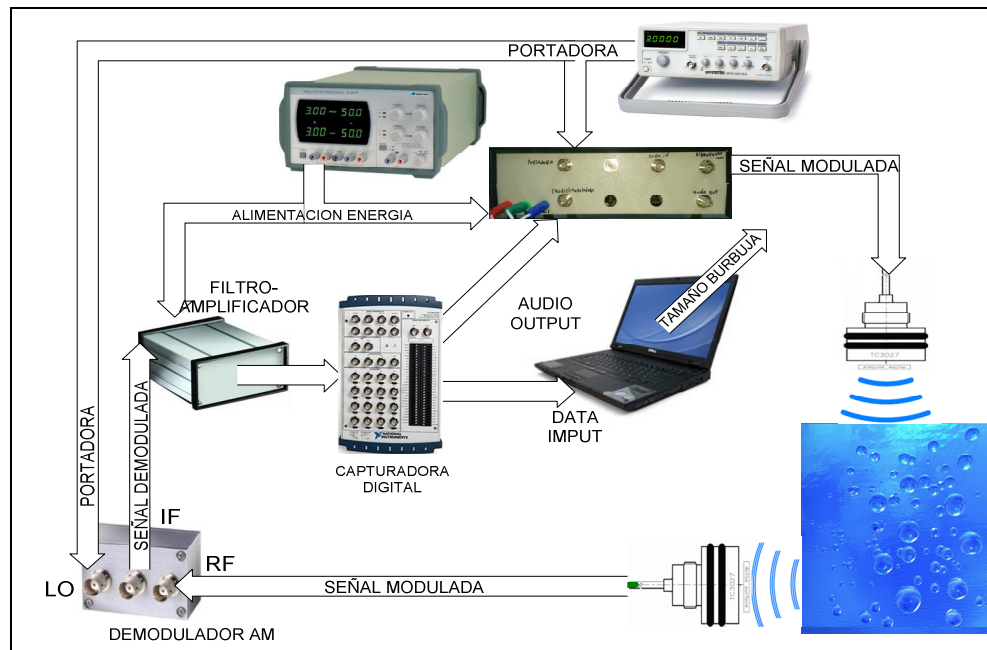


Figura 35. Sistema Medición tamaño burbujas generando ultrasonido con tarjeta National Instruments.

3.3 Funcionamiento del Equipo de Medición por Medios Acústicos y Generación de Burbujas

La manera en que funciona el equipo con todas sus partes se puede dividir en el funcionamiento de los aparatos electrónicos y el funcionamiento de los equipos para la generación y paso de burbujas.

3.3.1 Generación y paso de burbujas

La cámara de medición de acrílico está diseñada para admitir un rango amplio de tamaños de burbujas, como así también diferentes cantidades de aire dentro de él. La generación de burbujas se realiza fuera del recipiente con motivo de evitar la introducción del ruido de la generación de las burbujas en el sistema.

La generación de burbujas y el paso de estas por la cámara de medición tienen el siguiente funcionamiento:

- Las burbujas son generadas fuera del recipiente de acrílico, mediante tubos capilares o generación en una celda de flotación de laboratorio, para evitar introducir el sonido de formación de burbujas en la medición.
- Mediante una bomba peristáltica las burbujas generadas en un recipiente exterior son succionadas por una manguera flexible e

introducidas a la cámara de medición mediante la utilización de un tubo de PVC de 1/2" de diámetro. La succión se realiza por la parte superior de la cámara de acrílico y el arrastre que se produce hace que las burbujas asciendan por él.

- El agua, el aire y/o el mineral que se colecta debido a la succión es recirculado al recipiente exterior en que se generan las burbujas.

3.3.2 Aparatos Electrónicos

Los equipos eléctricos y el manejo de las señales funcionan de la siguiente manera para la configuración heterodina modificada que es la que obtuvo mejores resultados:

- Una fuente de poder supe con corriente a los distintos componentes electrónicos fabricados (modulador, amplificadores, filtros).
- Un generador de funciones es fijado a una frecuencia portadora de 1 [MHz].
- Mediante el uso de un computador y a través de la tarjeta NI se ajusta una señal a una frecuencia de interés determinada.
- Las señales anteriores son moduladas en un modulador AM para ser emitidas por un transductor de ultrasonido.
- Las señales resultantes de la respuesta de las burbujas a las excitaciones son adquiridas por un transductor de ultrasonido.
- Las señales adquiridas son pasadas por filtros que eliminan las frecuencias que son consideradas ruido de sala de máquinas (bajas frecuencias) y frecuencias de ultrasonidos que no corresponden a las mediciones realizadas.
- Posteriormente la señal pasa por la tarjeta de adquisición de datos y son procesadas mediante un código en Matlab en un PC conectado a la tarjeta.



Figura 36. Disposición de equipos en laboratorio.

3.4 Procesamiento de Señales de Audio

El procesamiento de las señales recibidas como resultado de las respuestas de las burbujas se hace a través del software Matlab, mediante un código de programación hecho especialmente para ser utilizado con las mediciones realizadas. El código programado, incluido en los anexos, realiza el siguiente proceso:

- El código identifica la señal capturada con la tarjeta de adquisición de datos. La señal es adquirida en unidades de voltaje.
- La adquisición de datos se realiza en períodos de muestro definidos por el usuario.
- El programa divide la señal adquirida en distintas ventanas de tiempo las cuales son programables. Típicamente se utilizan ventanas de 1 segundo de duración para caracterizar el comportamiento del sistema.
- El código aplica una transformada rápida de Fourier a cada una de las ventanas de la señal de voltaje.
- Se realiza la transformación de unidades de intensidad desde voltaje a decibeles según la relación conocida.
- Los valores resultantes de la transformada de Fourier, tanto en voltaje como en decibeles son guardados en archivos de textos que permiten su manipulación para un procesamiento de datos posterior.

3.5 Procedimiento y Campaña Experimental

Etapa de correlación y validación de datos para encontrar tendencias entre tamaños de burbujas y señales acústicas. Se estudia la configuración de excitación más prometedora y se establecen relaciones entre DTB o tamaños estadísticos (medidos por medio de análisis de imágenes) con la intensidad de señales sonoras recibidas de las burbujas. Al concluir esta etapa se establece un modelo de ajuste entre tamaño de burbuja e intensidad de señal.

Contrariamente a lo que esperado de manera teórica, las distintas clases de tamaños de burbujas no muestran preferencias (mayor intensidad de señales) a lo largo del espectro de frecuencias, y por lo tanto no se puede construir la DTB en base a emisiones acústicas. A lo largo del estudio de las distintas configuraciones se logró establecer que al perturbar las burbujas con señales de ultrasonido la principal diferencia entre diferentes DTB está en los niveles de intensidad que generan al interactuar con la señal. Basado en esta observación, el procedimiento para establecer el modelo tamaño-intensidad es:

- Generación de DTB en celda de flotación que puede variarse mediante la adición de espumante y las variables operacionales de la celda.
- Aplicación de señales de ultrasonido de la forma $1 [MHz] + \Delta f$ realizando un barrido de frecuencias, donde Δf es una frecuencia variable. Típicamente se realizaron barridos desde 1 [kHz] hasta 10 [kHz] con saltos de 50 [Hz], esto da un total de 181 frecuencias o muestras obtenidas por prueba.
- Grabación de las señales regresadas de la interacción entre las burbujas y la señal de ultrasonido. Los datos son guardados en archivos de texto que pueden ser procesados posteriormente.
- Toma de fotografías por cada prueba realizada. Las imágenes son tomadas simultáneamente con la medición por medio de audio para conocer el tamaño de burbujas que se está midiendo.
- Análisis de las grabaciones hechas con ultrasonido. Se aplica la transformada de Fourier y se establecen las intensidades de señales acústicas para cada una de las muestras. Posteriormente se establece un promedio de las intensidades medidas a lo largo del barrido determinado para la prueba.
- Análisis de imágenes recolectadas. El conteo de burbujas y medición de su tamaño se realiza manualmente en el software AutoCAD para evitar los sesgos provocados por el traslape de burbujas.
- Establecer los datos estadísticos extraídos del conteo de burbujas, como son: DTB, número de burbujas, d_{10} , d_{32} , ϵ_g .
- Relacionar la intensidad promedio medida en cada prueba con los respectivos datos extraídos del análisis de imágenes.
- Validar el modelo con la cantidad suficiente de datos.

Se probaron las siguientes condiciones para burbujas generadas en la celda de flotación:

Tabla 2. Set de pruebas para modelo tamaño de burbuja - intensidad de señal.

Set	Concentración Espumante	Velocidad de Agitación	Flujo de Aire
	[ppm]	[rpm]	[lt/min]
A	30	300	5
	30	400	5
	30	500	5
	30	600	5
B	30	300	10
	30	400	10
	30	500	10
	30	600	10

Cada set de pruebas se realizó en triplicado, por lo tanto se disponen de 24 puntos para la construcción del modelo.

4 CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE TÉCNICA ACÚSTICA

4.1 Elección de Configuración Utilizada

De las configuraciones posibles que se pudieron estudiar se escogió la siguiente:

- Transductor emisor de señales a 1 [MHz] más una señal de interés (en rango de 1 a 10 [kHz]), en línea con el paso de burbujas.
- Transductor receptor ubicado a 90° del emisor y en línea con el paso de burbujas, recibe en la misma frecuencia emitida.

Esta configuración resultó ser la más prometedora en un primer reconocimiento del sistema porque permite rápidamente detectar la presencia de burbujas en el sistema. Ver anexos para consultar el desempeño de las otras configuraciones.

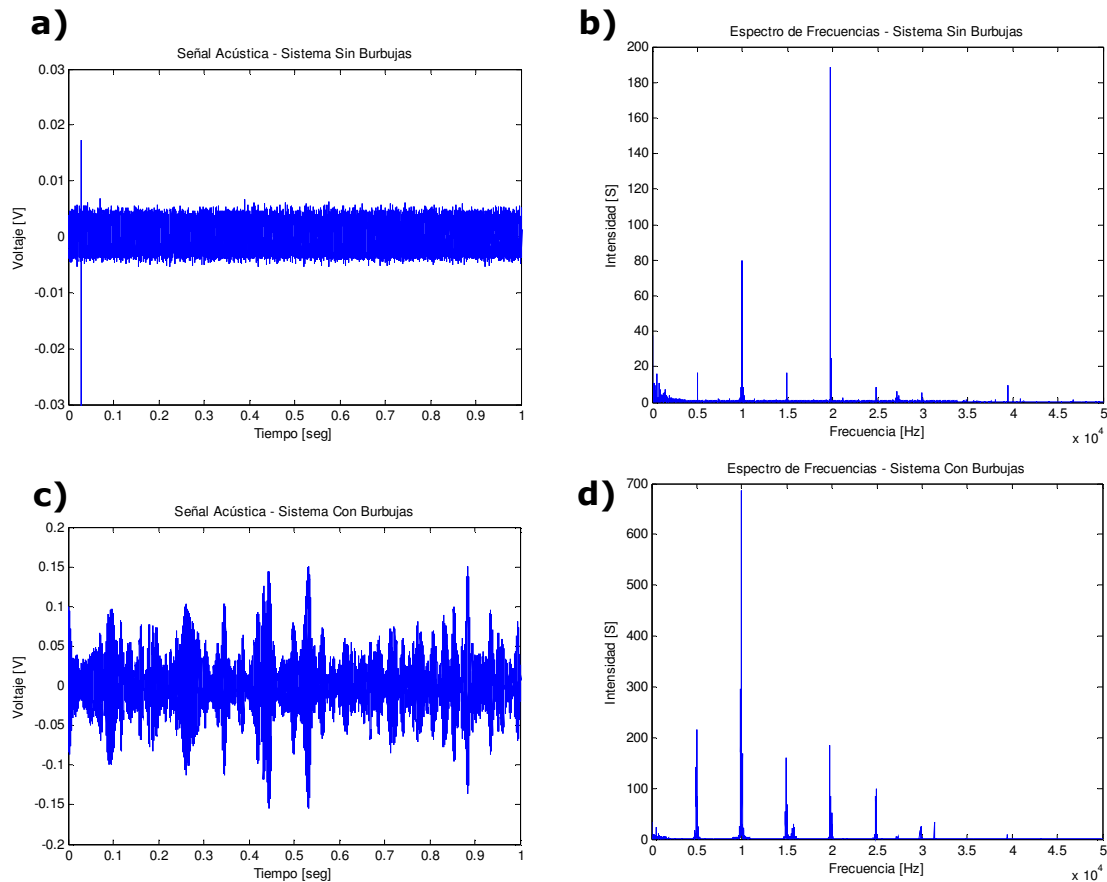


Figura 37. Comportamiento del sistema: a) señal sistema sin burbujas; b) señal sistema con burbujas; c) espectro de frecuencias sistema sin burbujas; d) espectro de frecuencias sistema con burbujas.

Se observa que las burbujas producen una perturbación en la señal acústica emitida, por lo que es fácilmente reconocible su presencia en el

sistema. El efecto en el espectro de frecuencias es un aumento significativo en la intensidad recibida. Por otro lado es importante notar el efecto en las frecuencias armónicas a la frecuencia inyectada, las cuales también reaccionan a la presencia de las burbujas.

Una ventaja potencial de esta configuración es que las estimulaciones de audio y la recepción de la respuesta de las burbujas se hacen en el rango de ultrasonido, por lo tanto el ruido de sala de máquinas queda por debajo de estas frecuencias y no interfiere en las mediciones.

Todas las pruebas realizadas para construir el modelo de tamaño de burbuja y las pruebas de estudio de coalescencia se realizan en base a esta configuración.

4.2 Modelo Tamaño Burbuja v/s Intensidad de Señal

4.2.1 Pruebas Distribuciones Monotamaño

Primeramente se realizaron pruebas con distribuciones monotamaños de burbujas, es decir la distribución está representada por un único tamaño. Las burbujas fueron generadas en tubos capilares que producen burbujas de un tamaño fijo en un flujo constante.

Los tamaños de las burbujas fueron identificados según su frecuencia natural de oscilación, midiendo el sonido producido al momento de su generación en el tubo capilar (según las pruebas revisadas en trabajos anteriores). La frecuencia medida corresponde al tamaño de burbuja generado (relación de Minnaert) y es la misma frecuencia de resonancia de la burbuja.

Se realizaron medidas para 2 distintos tamaños de burbujas haciendo un barrido que coincidiera con la frecuencia correspondiente al tamaño. Las frecuencias estudiadas corresponden a 2,1 [kHz] y 2,6 [kHz]. El barrido en presencia de burbujas se compara con un barrido en ausencia de éstas, realizando la diferencia de ambos y rescatando la intensidad resultante. Los resultados fueron:

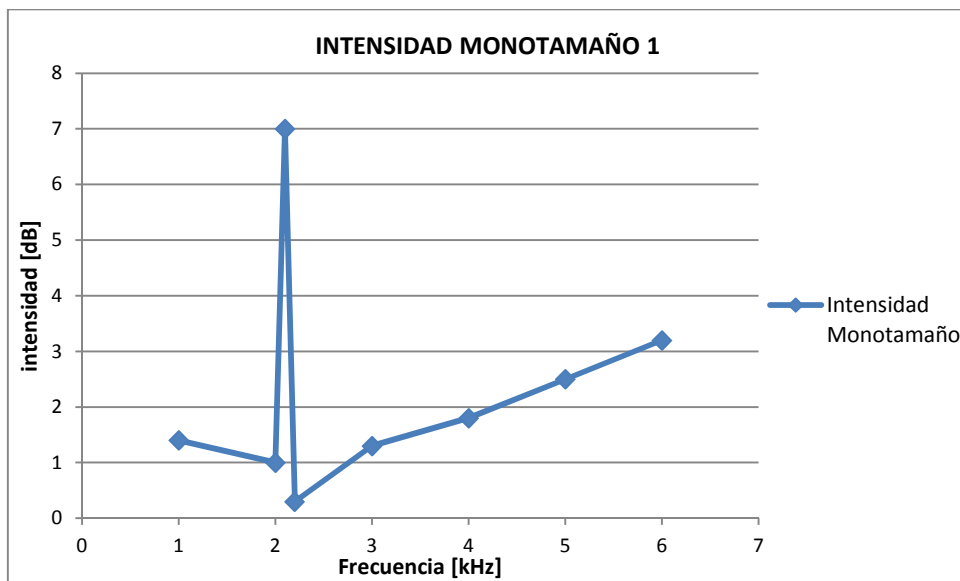


Figura 38. Intensidad de señal de distribución monotamaño de burbujas, correspondiente a una frecuencia natural de 2,1 [kHz] medida en la generación.

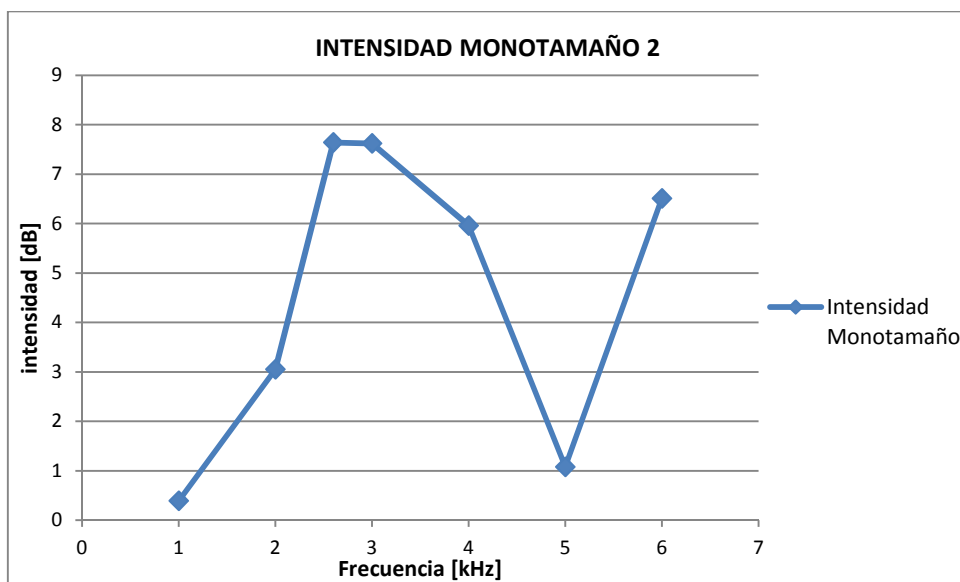


Figura 39. Intensidad de señal de distribución monotamaño de burbujas, correspondiente a una frecuencia natural de 2,6 [kHz] medida en la generación.

De los resultados se observa que para frecuencias de excitación cercanas a la frecuencia natural la intensidad es mayor, lo que indica que existe resonancia de este tamaño al estimularla con señales sonoras. Luego es posible identificar en una distribución monotamaño la frecuencia de resonancia correspondiente mediante la mayor diferencia de intensidades encontrada.

Por otro lado se ve que para otras frecuencias distintas a la de resonancia, también se presentan ciertas respuestas, siendo la diferencia entre

intensidades de un sistema sin burbujas y un sistema con burbujas mayor a cero. Esto puede deberse a un efecto de dispersión de la señal acústica por parte de las burbujas.

4.2.2 Pruebas DTB en Sistema Bifásico

Primeramente se intentó relacionar la distribución de tamaños de burbujas con la intensidad de señal acústica al realizar el barrido de frecuencias, de manera similar a lo hecho para el caso monotamaños. Los resultados que se obtuvieron no permiten relacionar la DTB con las emisiones acústicas ya que no se observan preferencias en las intensidades para las frecuencias correspondientes a los tamaños de burbujas que componen la DTB. En la siguiente figura se puede apreciar la respuesta de una DTB generada a las mismas condiciones operacionales (se puede asumir similitud entre las DTB) para 2 pruebas (barrido de frecuencias) distintas:

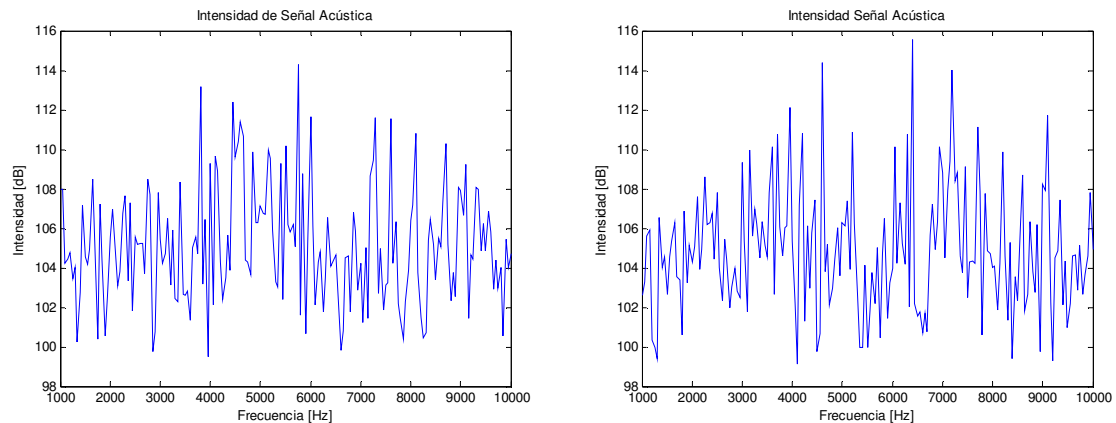


Figura 40. Ejemplo de prueba estándar de barrido de frecuencia: a) Barrido para DTB generada en celda de flotación; b) Barrido para DTB a las mismas condiciones operacionales anteriores.

Claramente no es posible relacionar tamaños de burbujas (en su equivalente de frecuencias) con el grado de intensidad ya que los peaks de intensidades parecen ser aleatorios. Este fenómeno fue observado en todas las pruebas realizadas no pudiéndose obtener una reciprocidad entre intensidad y DTB.

La principal variabilidad que se observa al realizar las pruebas se da en la intensidad promedio de señal acústica recibida del sistema. Se aprecia que para distintas condiciones operacionales, y por ende para distintos tamaños de burbujas existen cambios en la intensidad promedio a lo largo del barrido de frecuencias.

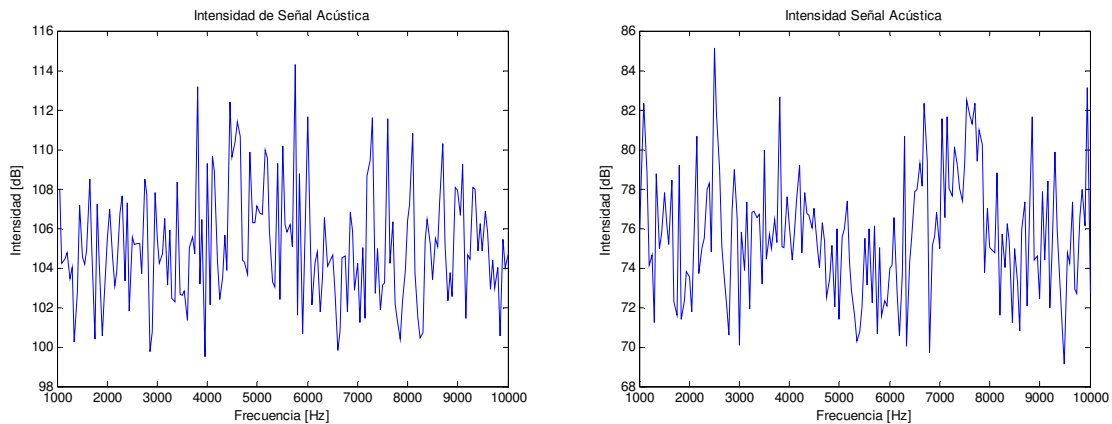


Figura 41. Barrido de frecuencias: a) Condición 1: velocidad de agitación 400 rpm, flujo de aire 10 lt/min, concentración espumante 15 ppm MIBC; b) Condición 2: velocidad de agitación 300 rpm, flujo aire 10 lt/min, concentración espumante 5 ppm MIBC.

En el ejemplo mostrado en la figura se observa que para distintas condiciones operacionales (distintos DTB) se obtienen respuestas en niveles de intensidad distintos, en torno a los 105 [dB] para el caso 1 y en 76 [dB] para el caso 2. Los tamaños de burbujas son más pequeños en el primer caso debido al mayor grado de agitación del sistema y también a la mayor concentración de espumante.

En base a los resultados preliminares se exploró la dependencia de variables relacionadas a algún tamaño de burbuja promedio con la intensidad media de señales. Para hallar el modelo entre tamaño de burbuja e intensidad de señal se probaron las siguientes variables candidatas:

- Contenido de aire ϵ_g (calculado en base al análisis de imágenes).
- Número o cantidad de burbujas N_b .
- Diámetro medio d_{10} .
- Diámetro de Sauter d_{32} .

De las variables candidatas para construir el modelo tamaño de burbuja e intensidad de señal acústica el tamaño promedio d_{10} no presentó ninguna correlación con la intensidad, por lo que se descartó para el modelo (ver Anexos C.2).

Las variables ϵ_g y N_b mostraron un grado de correlación lineal con la intensidad acústica promedio, siendo el valor de R^2 de 0,65 y 0,64 respectivamente. El ajuste no es el óptimo ya que se tiene un gran grado de incertidumbre. Por otro lado estas variables por si solas no pueden constituir el modelo buscado ya que no relacionan directamente el tamaño de burbujas y es necesario conocer alguna otra variable relativa al gas para estimar un tamaño promedio (ver Anexos C.2).

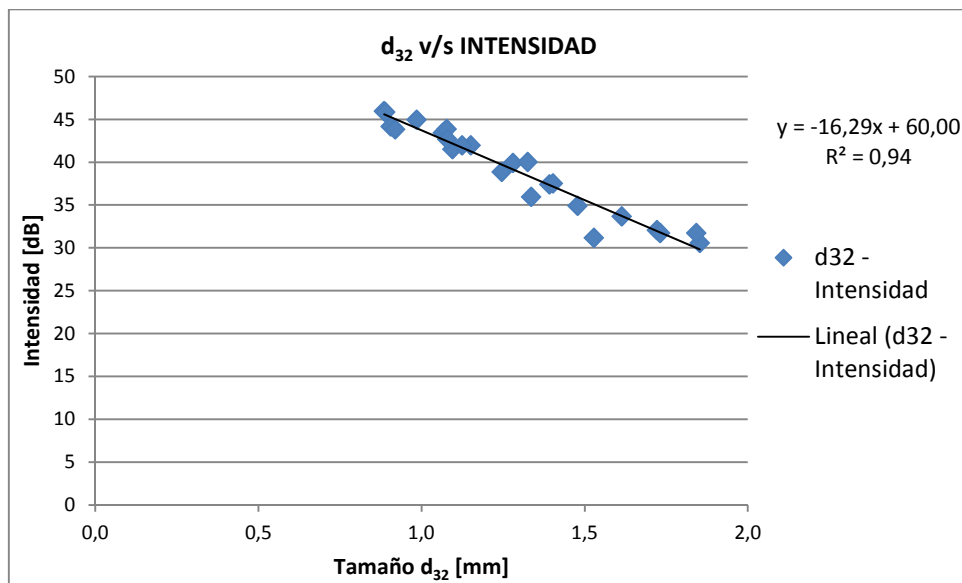


Figura 42. Relación diámetro d_{32} e intensidad de señal acústica.

Al comparar la intensidad promedio con el diámetro de Sauter se encuentra un buen ajuste de carácter lineal. Se observa que el diámetro d_{32} por si solo se correlaciona con la intensidad promedio de señal acústica entregando información valiosa de los valores medios de la DTB pero no de su forma. La relación encontrada permite caracterizar la distribución de tamaños y discernir entre una DTB más grande o más pequeña. El modelo encontrado es entonces:

$$I_{media} = -16,29 \cdot d_{32} + 60,00 \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

I_{media} : intensidad promedio medida a lo largo de un barrido de frecuencias, con unidades de [dB].

d_{32} : diámetro de Sauter en [mm].

Teóricamente el modelo tiene un rango de validez hasta los 3,68 [mm] de diámetro, que se obtiene al hacer la intensidad promedio igual a 0. Sin embargo, el modelo se completó con las pruebas posteriores, realimentando la información y probando la validez de éste hasta tamaños de 3 [mm] de diámetro.

4.2.3 Pruebas DTB en Sistema Trifásico

Con fin de evaluar el prototipo en una situación más cercana a lo que se realiza en las faenas industriales de flotación de minerales, se efectuaron pruebas en medio trifásico: agua, aire y sólido. Los parámetros utilizados en las pruebas fueron:

- Mineral de cuarzo molido a granulometría estándar usada en flotación (P_{80} de 200 [μm]).
- Concentración de sólidos en peso de un 30 % al interior de la celda de flotación.
- Concentración de espumante 30 [ppm MIBC] para asegurar la prevención de la coalescencia de burbujas.
- Flujo de aire variable: 5 [lt/min] y 10 [lt/min].
- Velocidad de agitación variable: 300, 400, 500 y 600 [rpm].

Cabe señalar que ante la presencia de mineral, la succión que se efectúa por parte de la bomba peristáltica arrastra la pulpa hasta la zona de medición al interior de la cámara de medición de acrílico. Por lo tanto se hace necesario un tiempo de acondicionamiento adecuado para que la concentración de pulpa en el estanque sea constante. Se estimó un tiempo adecuado de acondicionamiento de 5 minutos. Una vez finalizada la preparación se procede a realizar la medición de manera normal como fue establecido.

En la siguiente figura se muestran los resultados que se obtuvieron para las pruebas en sistema trifásico para los parámetros operacionales ya señalados:

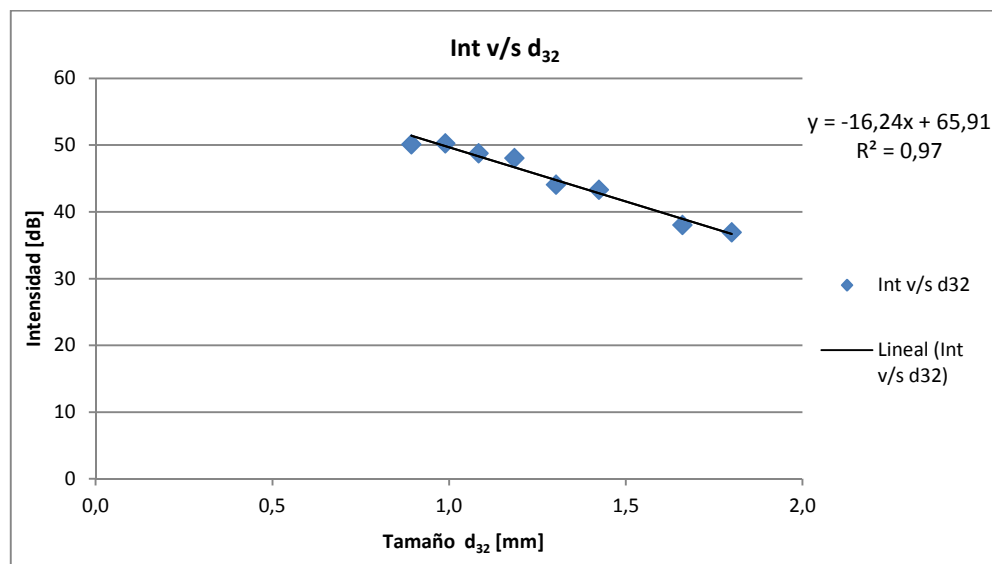


Figura 43. Pruebas para sistema con presencia de mineral.

Se observa que la tendencia lineal se mantiene en caso de presencia de sólidos en el sistema, conservando la pendiente encontrada en el modelo para el caso bifásico. El modelo encontrado que relaciona el tamaño d_{32} con la intensidad promedio de señal para el caso bifásico es aplicable para un sistema con presencia de sólidos, pero se debe tener en cuenta el efecto que tienen éstos en el resultado final. La diferencia en el coeficiente de posición

de la curva sugiere un desplazamiento de ésta con respecto a la situación sin sólidos, por lo tanto en una situación industrial se recomienda calibrar la medición para la concentración de sólidos encontrada en planta.

5 CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE TÉCNICA ACÚSTICA

A continuación se discuten los resultados encontrados para las pruebas realizadas en la construcción del modelo de intensidad de señal y tamaño de burbuja. Se tratan todas las pruebas realizadas: monotamaño, DTB completa y pruebas en sistema trifásico.

5.1 Monotamaños de Burbujas

En base a la configuración utilizada para la excitación mediante señales acústicas en un sistema bifásico es posible identificar rápidamente la fase gaseosa mediante la respuesta que retorna del sistema. Esto se hace posible debido a que las burbujas actúan como un agente dispersor de la señal aplicada, la cual se desvía en ellas y llega al receptor ubicado a 90° .

En el caso de distribuciones monotamaño de burbujas es posible identificar el efecto de la dispersión, ya que las diferencias entre intensidades en presencia y ausencia de burbujas es mayor a 0. En adición, para este tipo de pruebas es posible identificar el tamaño de burbuja presente debido a que el peak de intensidad se encuentra a la frecuencia correspondiente a la frecuencia natural o de resonancia. En base a los resultados se propone un modelo de respuesta de una burbuja tratada con este método de detección, en el cuál la señal devuelta tiene una componente de reflexión de la señal aplicada en la burbuja y una componente de resonancia pura.

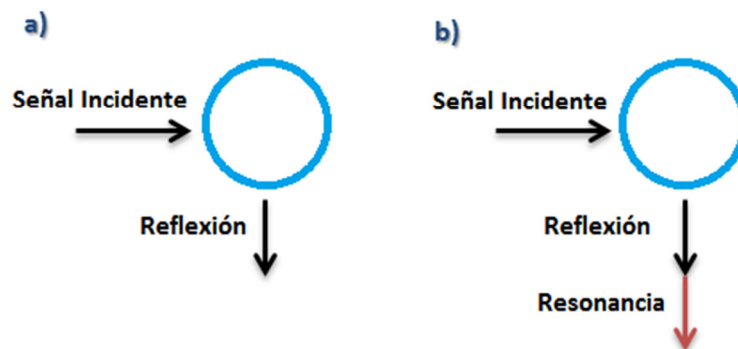


Figura 44. Modelo de respuesta de una burbuja al ser estimulada con la configuración utilizada: a) tamaño de burbuja no correspondiente a la frecuencia de excitación; b) tamaño de burbuja correspondiente a la frecuencia de excitación.

Si bien en los resultados es posible aplicar el modelo de respuesta de manera satisfactoria, el nivel de reflexión para frecuencias que no corresponden a la frecuencia natural del tamaño de burbuja estudiada no es constante, teniéndose distintos niveles de intensidad. Este fenómeno puede estar asociado a la presencia de otras frecuencias resonantes aparte de la

frecuencia natural, como por ejemplo los armónicos correspondientes. Debido a esto es posible que un peak de intensidad se pueda confundir con una burbuja resonante, por lo que es recomendable conocer un rango aproximado de frecuencias en el cuál viva la frecuencia correspondiente a la burbuja.

5.2 DTB en Sistema Bifásico – Intensidad de Señal

En presencia de una distribución de tamaños de burbujas el modelo propuesto para monotamaños no es aplicable. Luego de realizar los experimentos se obtiene una DTB conocida por medio de análisis de imágenes y una distribución de intensidades. A pesar de conocer la frecuencia de excitación que coincide con el tamaño de burbuja (frecuencia) de interés, no es posible identificar peaks de intensidades a lo largo del barrido, y por lo tanto la DTB no se puede construir en base a la intensidad de señal que entrega una clase de tamaño específica dentro del conjunto de burbujas. Se piensa que la respuesta de resonancia de las burbujas queda opacada por la reflexión de la señal en ellas, estando presente pero a niveles tan bajos que no es posible identificarla.

En la realización de las pruebas se identificaron variaciones en la intensidad promedio que se obtiene a lo largo de un barrido de frecuencias, observándose que para distintas DTB se obtienen distintos niveles de intensidad. Este fenómeno se hace más evidente para distribuciones totalmente distintas, siendo los niveles de intensidad muy distantes entre una DTB gruesa (tamaños grandes) y una DTB más fina (tamaños pequeños).

Al comparar la respuesta en intensidad de señal con variables relativas al aire como el contenido de aire y el número de burbujas, se observa una relación de ajuste lineal, que es aceptable. Debido a la manera en que se calcula el contenido de aire por medio de análisis de imágenes, es posible afirmar que esta variable es representativa del volumen de aire en el sistema, es así como se postula que la cantidad de aire que se mide influye en la reflexión de la señal acústica enviada. Sin embargo, la relación tiene un grado de incertidumbre considerable ya que el valor del R^2 es de aproximadamente 0,6.

Por otro lado, la cantidad de burbujas medidas también presenta un R^2 similar al caso del contenido de aire. Si se considera un volumen de aire constante, una mayor densidad de burbujas o cantidad de ellas, se traduce en un tamaño promedio menor y por lo tanto una mayor superficie de burbujas. En base a esto se puede postular que el área de burbujas disponible también influye en la reflexión de la señal.

Las variables relativas al aire estudiadas (N_b y ε_g) sugieren una dependencia directa con la intensidad de señal medida para las distintas pruebas, sin embargo por sí solas no entregan información concluyente que permita relacionar la intensidad con algún tamaño promedio o representativo de la DTB. Al estudiar la relación entre intensidad promedio y d_{32} , que por definición entrega información relativa al volumen de aire y superficie de burbujas, el ajuste es satisfactorio. La relación con el diámetro de Sauter es lineal y sugiere que el resultado de la interacción entre intensidad de señal y DTB depende tanto del área de superficie disponible para la reflexión de la señal como del volumen ocupado por las burbujas.

La relación entre tamaño promedio e intensidad es inversa, es decir ante una disminución del diámetro de Sauter se tendrá un aumento en la intensidad de la señal reflejada. Se encontró que el modelo lineal encontrado tiene validez hasta tamaños de 3 [mm] de diámetro y es aplicable para distribuciones de tamaños con forma gaussiana (en presencia de la cantidad adecuada de espumante) o para cualquier distribución de forma distinta. Esta característica permite la utilización del equipo en cualquier faena o cualquier proceso que requiera la identificación del tamaño representativo de la DTB. A pesar de no entregar información sobre la forma de la DTB, el equipo y el modelo tienen potencial para ser utilizado y eventualmente adaptado para fines de control de tamaño de burbujas en el proceso de flotación de minerales.

5.3 DTB en Sistema Trifásico – Intensidad de Señal

Se realizaron pruebas en sistema trifásico para un sistema con mineral de cuarzo molido a granulometría estándar utilizada en flotación de minerales con fin de replicar las condiciones típicas usadas en este proceso. Se utilizó una concentración de sólidos en peso de 30% para todas las pruebas y se cambiaron las variables operacionales para obtener distintas DTB.

Como primera observación se notó que las partículas más gruesas de mineral se estancaban en el recipiente de medición debido a la sedimentación. A pesar de esto último el sistema alcanza un estado estacionario y el paso de pulpa se hace constante para las partículas más finas, por lo que las mediciones fueron hechas de manera normal.

Al realizar el set de pruebas a idénticas condiciones para sistemas con y sin mineral, se observa que el caso trifásico entrega niveles de señal por sobre el caso bifásico. Al comparar ambas condiciones se ve que el sistema con mineral tiene una respuesta de casi 5 decibeles más. Este resultado sugiere que la presencia de mineral dentro del sistema también afecta la dispersión de la señal sonora dentro del recipiente. La superficie de las partículas de mineral podría actuar de la misma manera en que se propone

que actúa el área de las burbujas, cumpliendo la labor de reflector de la señal incidente. Es posible pensar entonces que la intensidad de señal que será reflejada debido a la presencia de mineral depende de la cantidad de mineral, o bien de la concentración de sólidos en la pulpa, sin embargo se requieren de pruebas adicionales a distintos c_p para corroborar lo planteado.

**PARTE II: APLICACIÓN DE TÉCNICA ACÚSTICA EN
EL ESTUDIO DE CURVAS DE COALESCENCIA PARA
DISTINTOS REACTIVOS**

6 CAPÍTULO VI: METODOLOGÍA DE ESTUDIO DE CURVAS DE COALESCENCIA

6.1 Equipos y Materiales

Para realizar la investigación se utilizó el instrumento desarrollado para medir el tamaño promedio de burbujas por medios acústicos en forma continua. Estos equipos ya fueron presentados en los capítulos anteriores de este trabajo (ver Capítulo 3).

6.1.1 Reactivos Utilizados

Se utilizaron los siguientes reactivos para controlar los tamaños de burbujas mediante la disminución de la coalescencia:

Tabla 3. Descripción de reactivos utilizados para el estudio de curvas de coalescencia.

REACTIVO	CARACTERÍSTICAS	
MIBC	Composición	4-Metil 2-pentanol 98%
	Gravedad Específica	0,802 a 25°C
	Proveedor	Sigma Aldrich
Cloruro de Sodio	Composición	NaCl >99,5%
	Peso Molecular	58,44 gr/mol
	Proveedor	Merck

6.2 Procedimiento y Campaña Experimental

Esta etapa corresponde a una aplicación del modelo tamaño-intensidad. Usando la detección de tamaños por medios acústicos se procede a estudiar las curvas de coalescencia generadas en una celda de flotación con la adición de espumante MIBC y sal NaCl. A partir de estos resultados se establece la dependencia entre el CCC y las condiciones del sistema.

Las pruebas de coalescencia se realizan según el siguiente procedimiento:

- Preparación del sistema. Las pruebas se realizan en sistema bifásico (agua-aire) y se agregan reactivos para reducir la coalescencia, MIBC y NaCl. Para esto se deben calcular las concentraciones de reactivos según la prueba a efectuar y adicionar en la cantidad adecuada.
- Tiempo de acondicionamiento adecuado para que el sistema alcance una concentración homogénea. Se establecen 5 minutos de acondicionamiento por prueba.

- Medición de tamaño promedio de burbujas por prueba en base al modelo encontrado en la etapa anterior. Se estudian diversas condiciones en la celda de flotación, variando la concentración de reactivos, la velocidad de agitación y el flujo de aire inyectado.
- Construcción de curvas de coalescencia (concentración de reactivo v/s tamaño de burbuja) para las distintas condiciones operacionales de la celda.
- Ajuste de las curvas de coalescencia con el modelo de Nasset y obtención del valor CCC95 para cada condición estudiada.
- Establecer la dependencia de CCC95 y el flujo de aire, y la dependencia de CCC95 y la velocidad de agitación.

Se estudiaron las siguientes condiciones para burbujas generadas en la celda de flotación a escala laboratorio:

Tabla 4. Condiciones estudio coalescencia con MIBC.

Concentración MIBC	Velocidad de Agitación	Flujo de Aire
[ppm]	[rpm]	[lt/min]
0; 5; 10; 15; 20; 25; 30	300; 400; 500; 600	5; 10; 15

Tabla 5. Condiciones estudio coalescencia con NaCl.

Concentración NaCl	Velocidad de Agitación	Flujo de Aire
[M]	[rpm]	[lt/min]
0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6	300; 400; 500; 600	5; 10; 15

En total se tienen 84 pruebas por cada reactivo utilizado.

7 CAPÍTULO VII: RESULTADOS DE ESTUDIO DE CURVAS DE COALESCENCIA

7.1 Reproducibilidad

Con el modelo encontrado se midieron los tamaños d_{32} en base a las intensidades de señales acústicas para DTB generadas en la celda de flotación a escala de laboratorio. Se variaron las condiciones operacionales de la celda y la concentración de espumante para obtener distintas distribuciones de tamaños, según la campaña experimental vista en el capítulo anterior. Para confirmar la reproducibilidad del sistema de medición se realizó una condición en triplicado, obteniéndose lo siguiente:

Tabla 6. Valores d_{32} para prueba en triplicado.

Concentración MIBC [ppm]	Prueba 1 d_{32} Modelo [mm]	Prueba 2 d_{32} Modelo [mm]	Prueba 3 d_{32} Modelo [mm]
0	4,84	4,67	4,70
5	2,61	2,51	2,63
10	1,41	1,29	1,40
15	0,98	0,88	0,90
20	0,85	0,91	0,84
25	0,84	0,92	0,93
30	0,87	0,94	0,94

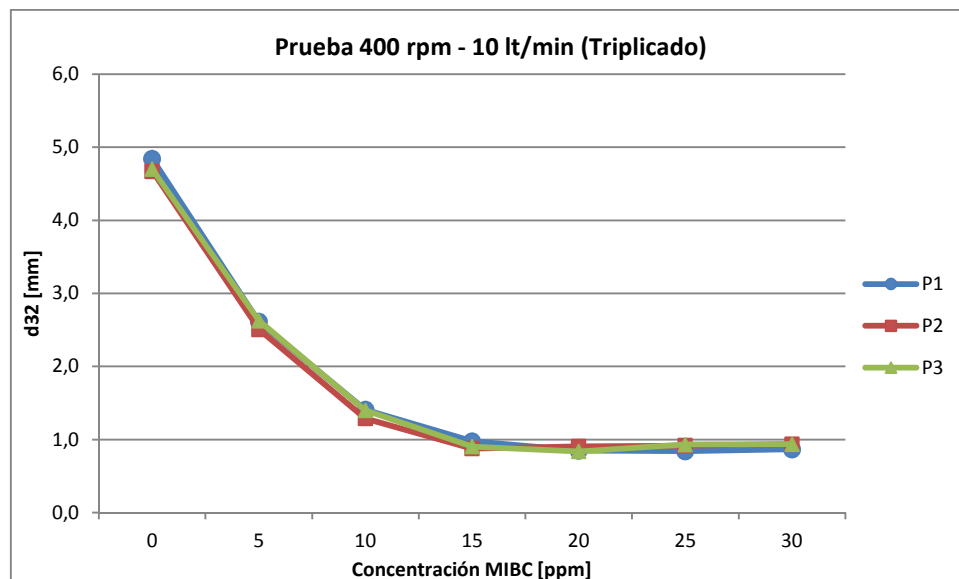


Figura 45. Reproducibilidad de experimentos. Condiciones operacionales: agitación 400 [rpm], flujo de aire 10 [lt/min], concentración MIBC variable.

Se ajustaron los resultados al modelo de Nasset para curvas de coalescencia y se obtuvieron los resultados de tamaño d_{32} límite y CCC95 para las pruebas de reproducibilidad:

Tabla 7. Variabilidad asociada a CCC95 y d_{32} para pruebas de reproducibilidad.

	CCC95	Variabilidad CCC95	d_{32} Límite	Variabilidad d_{32}
	[ppm MIBC]	[%]	[mm]	[%]
Prueba 1	16,35	3,43	0,85	-4,44
Prueba 2	14,95	-5,44	0,92	3,22
Prueba 3	16,13	2,01	0,90	1,21
Promedio	15,81	-	0,89	-

La reproducibilidad de los experimentos es buena ya que se obtienen prácticamente las mismas curvas de coalescencia en las 3 pruebas testeadas y también los resultados de los valores CCC95 y d_{32} límite presentan una variabilidad pequeña de hasta un 5%.

7.2 Curvas Espumante MIBC

Validada la reproducibilidad de las mediciones se realiza la campaña experimental propuesta en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

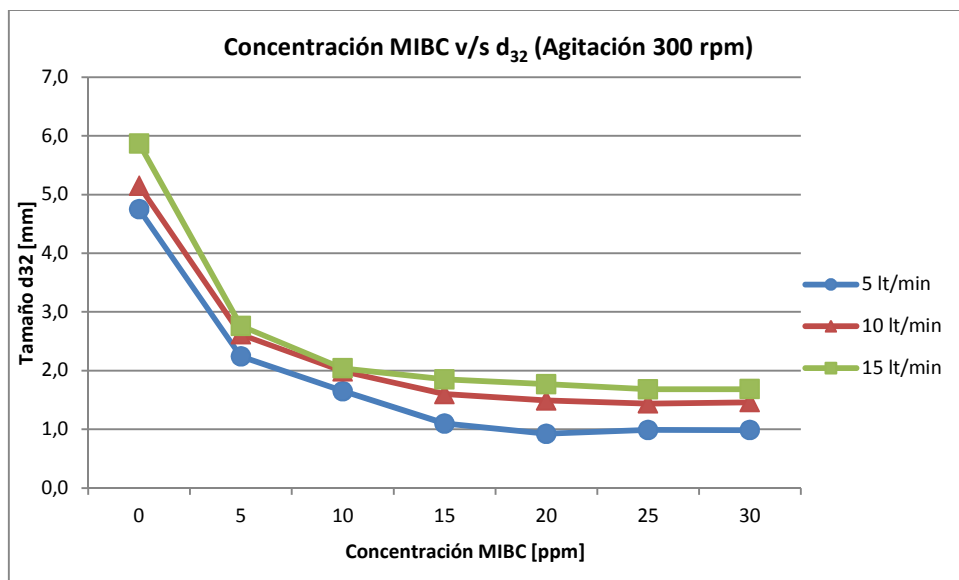


Figura 46. Curvas de coalescencia MIBC para velocidad de agitación 300 [rpm] y flujo de aire variable.

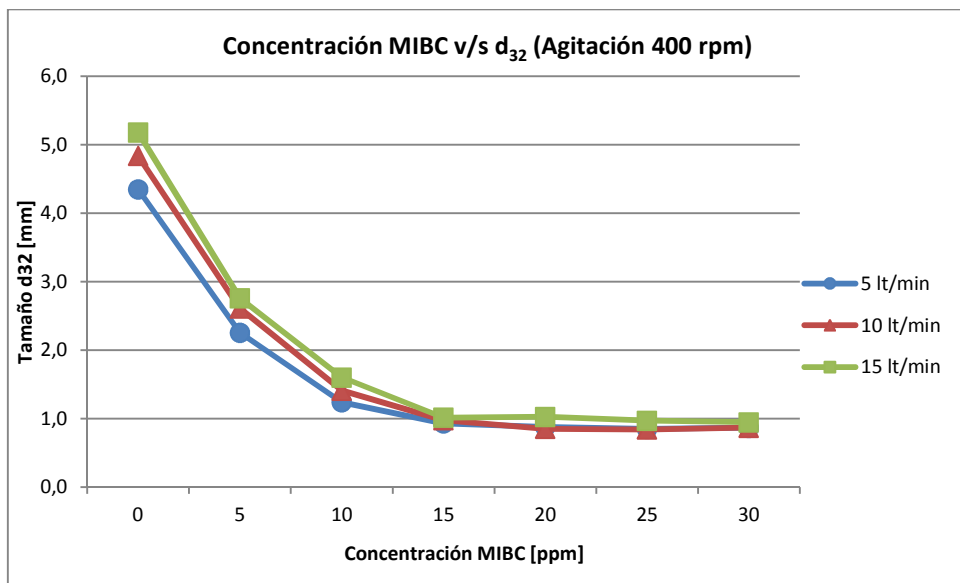


Figura 47. Curvas de coalescencia MIBC para velocidad de agitación 400 [rpm] y flujo de aire variable.

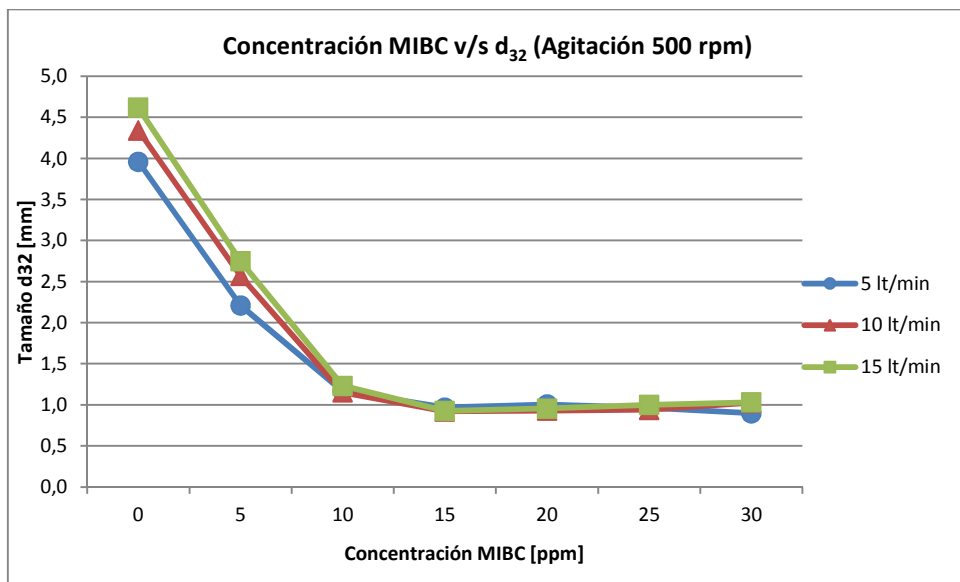


Figura 48. Curvas de coalescencia MIBC para velocidad de agitación 500 [rpm] y flujo de aire variable.

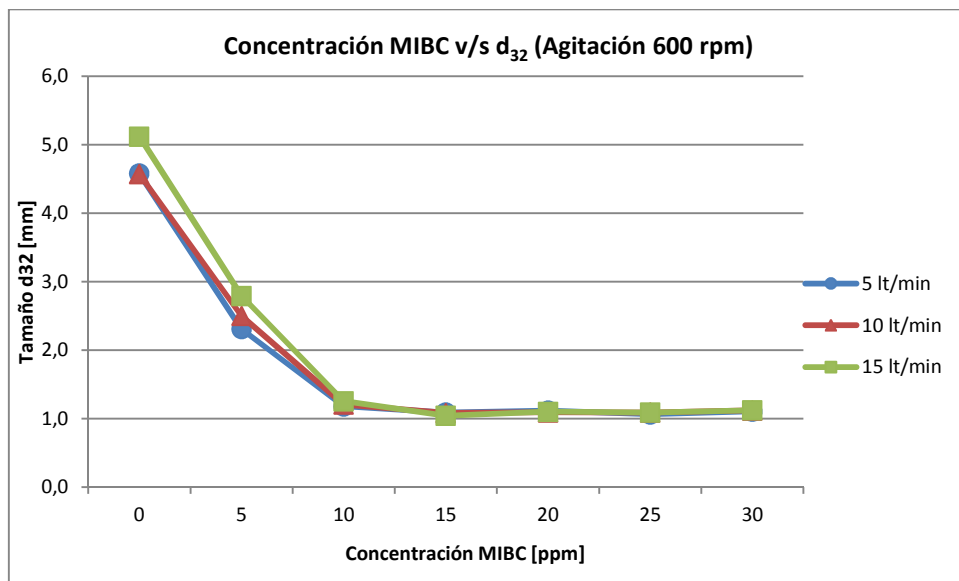


Figura 49. Curvas de coalescencia MIBC para velocidad de agitación 600 [rpm] y flujo de aire variable.

Es observable de la forma en que se presentan los resultados que para velocidades de agitación mayores el tamaño límite que se alcanza es prácticamente el mismo. Para una agitación menor, como es el caso de 300 [rpm], el tamaño límite es fuertemente dependiente del flujo de aire inyectado en la celda, aumentando con la cantidad de aire. Por otro lado se nota que para concentraciones de espumante por debajo de la CCC la variabilidad de los tamaños es dependiente del flujo de aire para todas las agitaciones probadas.

Para apreciar la variabilidad de los datos en función de la velocidad de agitación, se presentan de la siguiente manera:

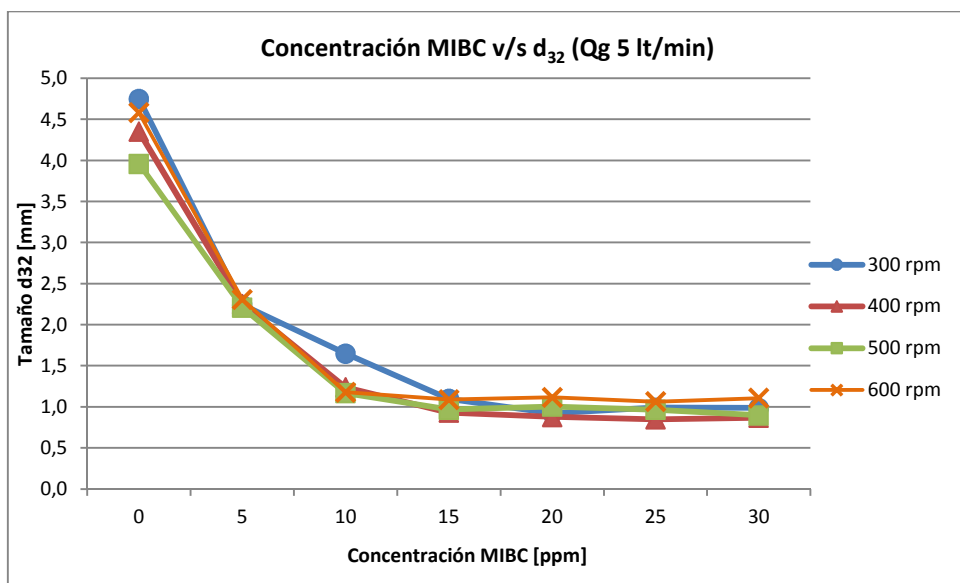


Figura 50. Curvas de coalescencia MIBC para flujo de aire nominal de 5 [lt/min] y velocidad de agitación variable.

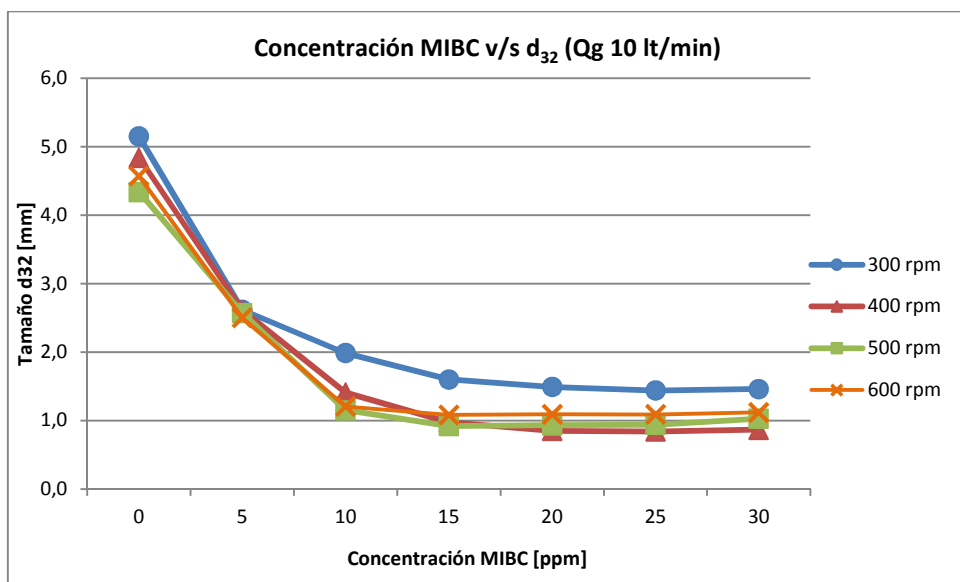


Figura 51. Curvas de coalescencia MIBC para flujo de aire nominal de 10 [lt/min] y velocidad de agitación variable.

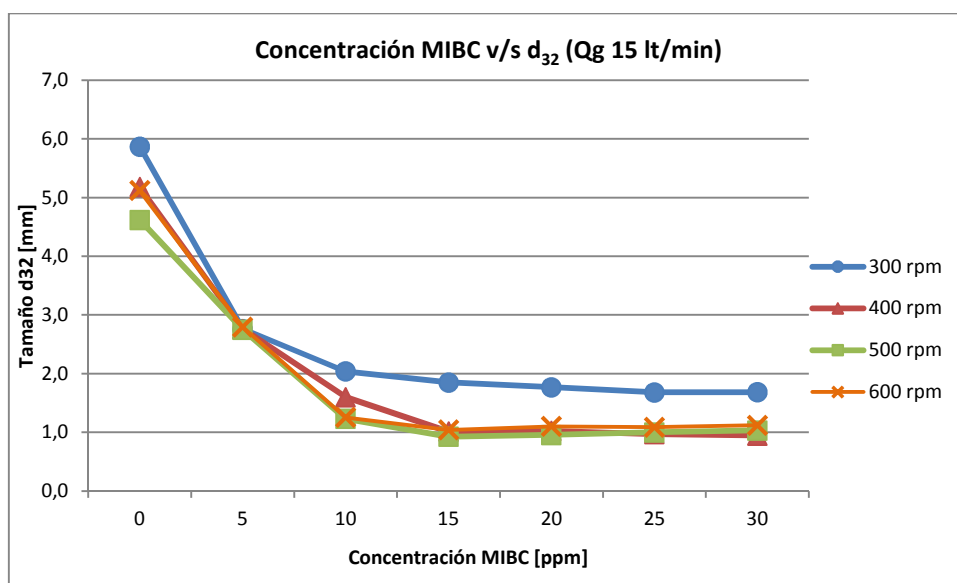


Figura 52. Curvas de coalescencia MIBC para flujo de aire nominal de 15 [lt/min] y velocidad de agitación variable.

Se observa que las curvas de coalescencia para flujos de aire bajos presentan una variabilidad mayor al cambiar las velocidades de agitación. Para el flujo de aire más alto que se probó (15 [lt/min]) se obtienen tamaños límites similares, excepto para la velocidad de agitación baja. Sin embargo es posible apreciar, aunque levemente, que los tamaños d_{32} dependen de la velocidad de agitación del sistema a pesar de estar en una condición saturada de espumante.

Para obtener valores numéricos de la concentración crítica se ajustaron las curvas obtenidas con el modelo exponencial de Nasset y se obtuvieron los valores de CCC95 y el diámetro correspondiente al tamaño mínimo o límite generado en cada prueba (d_L). A continuación se presentan la calidad de ajuste de las curvas experimentales con el modelo de Nasset en base al error cuadrático medio (ECM):

Tabla 8. Error cuadrático medio para el ajuste de las curvas de coalescencia con MIBC.

ECM Agitación [rpm]	Flujo Aire Nominal		
	5 [lt/min]	10 [lt/min]	15 [lt/min]
300	0,06	0,02	0,02
400	0,03	0,07	0,06
500	0,07	0,28	0,33
600	0,09	0,17	0,26

Al ajustar las curvas es posible obtener los valores CCC95 y d_L , teniéndose como resultado:

Tabla 9. Valores CCC95 para campaña experimental con MIBC.

CCC95 [ppm]	Flujo Aire Nominal		
Agitación	5	10	15
[rpm]	[lt/min]	[lt/min]	[lt/min]
300	14,49	13,77	11,42
400	14,91	16,19	16,33
500	14,94	15,10	15,35
600	12,55	13,59	13,99
CCC95 Promedio	14,39		

Los resultados sugieren la dependencia del CCC95 con las variables operacionales. Se observa un leve aumento del punto de concentración crítica con incrementos de flujo de aire, como también una dependencia con la velocidad de agitación disminuyendo el CCC95 al aumentar la velocidad. Es interesante notar que a una velocidad de agitación de 300 [rpm], que es una agitación baja, las tendencias se revierten, probablemente debido a la pobre dispersión de aire en la celda a este grado de agitación.

Los resultados obtenidos para el valor del diámetro límite son:

Tabla 10. Valores d_L para campaña experimental con MIBC.

d_L [mm]	Flujo Aire		
Agitación	5	10	15
[rpm]	[lt/min]	[lt/min]	[lt/min]
300	1,18	1,63	1,89
400	1,03	1,06	1,16
500	1,08	1,15	1,20
600	1,26	1,28	1,30
d_L Promedio	1,08		

De los resultados se observa que el tamaño d_{32} límite aumenta levemente con la velocidad de agitación y con el flujo de aire. De la misma manera se aprecia que para una velocidad de agitación baja los tamaños límites son mucho mayores.

A pesar de las variaciones observadas tanto para CCC95 y d_L los valores encontrados parecen vivir en regiones de concentración de espumante y tamaño de burbuja bastante acotadas. Para ayudar a discernir sobre la naturaleza de estos valores se realiza un test ANOVA estudiando las varianzas de los resultados (consultar en punto 4.4.4. Test ANOVA).

7.3 Curvas NaCl

Se realizó la campaña experimental para el uso de NaCl como agente inhibidor de coalescencia. Modificando las variables operacionales y la concentración de NaCl se obtuvieron distintas DTB con distintos valores de diámetros de Sauter.

La adición de sal al sistema se calcula en base al peso molecular de la sal utilizada, el cual es de 58,44 [gr/mol] según la información proporcionada por el proveedor. Se calculó la cantidad de NaCl necesaria para utilizar en los 18,8 [lts] que se utilizan en las pruebas:

Tabla 11. Requerimientos de NaCl para las distintas concentraciones.

Concentración Molar [M]	Masa NaCl [gr]
0,1	109,87
0,2	219,73
0,3	329,60
0,4	439,47
0,5	549,34
0,6	659,20

A continuación se presentan los resultados obtenidos por cada velocidad de agitación probada:

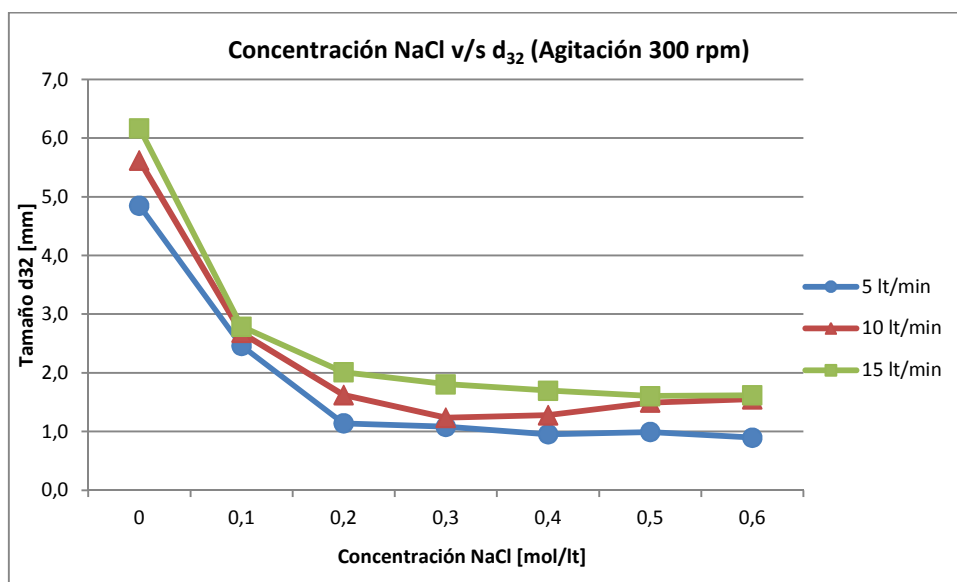


Figura 53. Curvas de coalescencia NaCl para velocidad de agitación 300 [rpm] y flujo de aire variable.

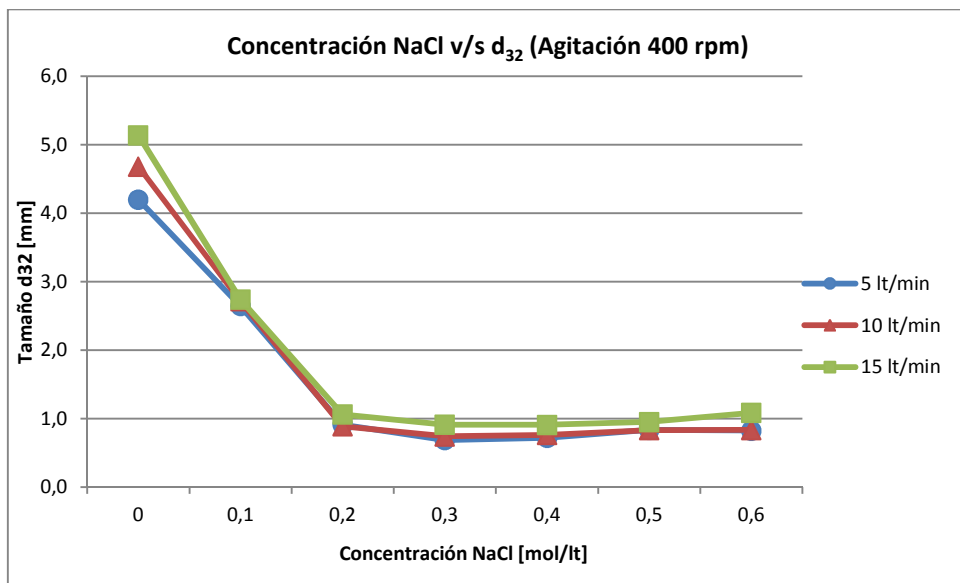


Figura 54. Curvas de coalescencia NaCl para velocidad de agitación 400 [rpm] y flujo de aire variable.

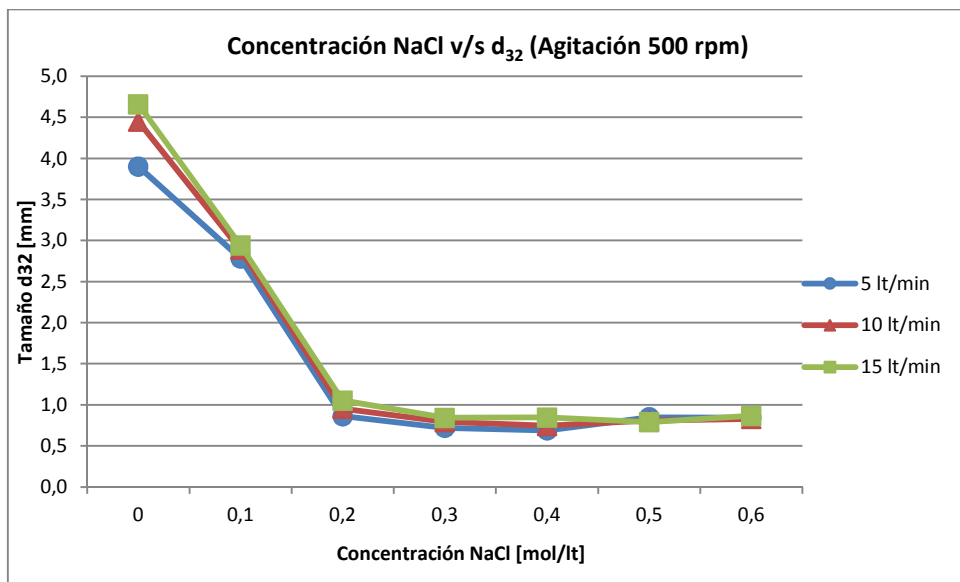


Figura 55. Curvas de coalescencia NaCl para velocidad de agitación 500 [rpm] y flujo de aire variable.

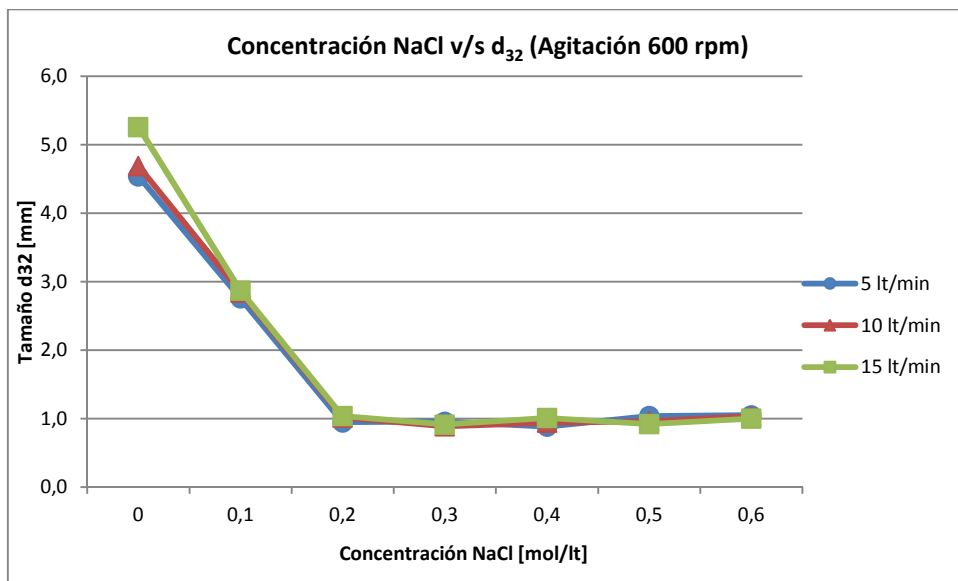


Figura 56. Curvas de coalescencia NaCl para velocidad de agitación 600 [rpm] y flujo de aire variable.

Se observa que al igual que el caso con MIBC, para velocidades de agitación mayores, los valores de tamaño límite que se alcanzan son similares y el punto de CCC se alcanza cerca de los 0,2 [M]. Para la menor agitación probada se observa que el desempeño del agente depende mucho más de la cantidad de aire inyectada al sistema, teniéndose tamaños límites mayores para flujos más grandes.

Para apreciar la variabilidad de los datos en función de la velocidad de agitación, se presentan de la siguiente manera:

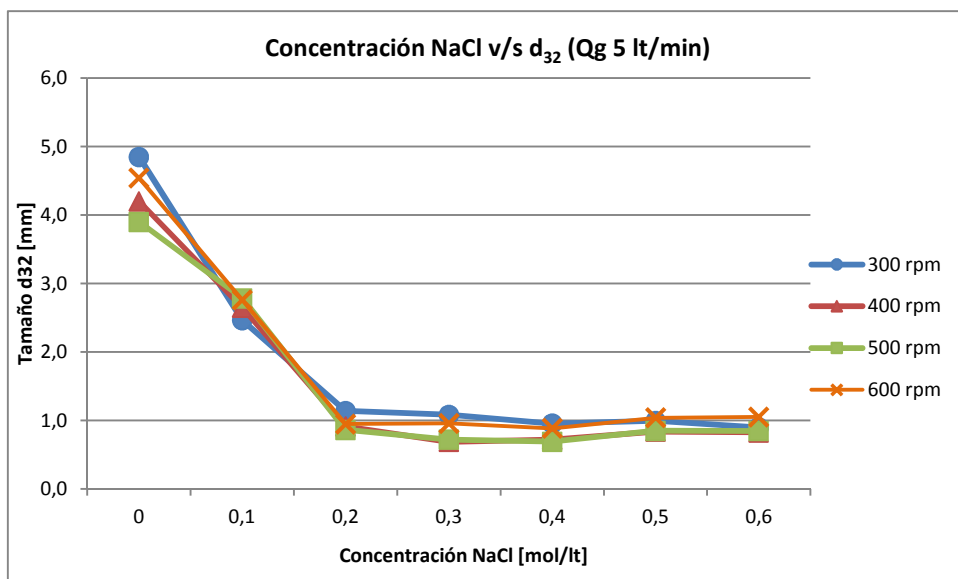


Figura 57. Curvas de coalescencia NaCl para flujo de aire nominal de 5 [lt/min] y velocidad de agitación variable.

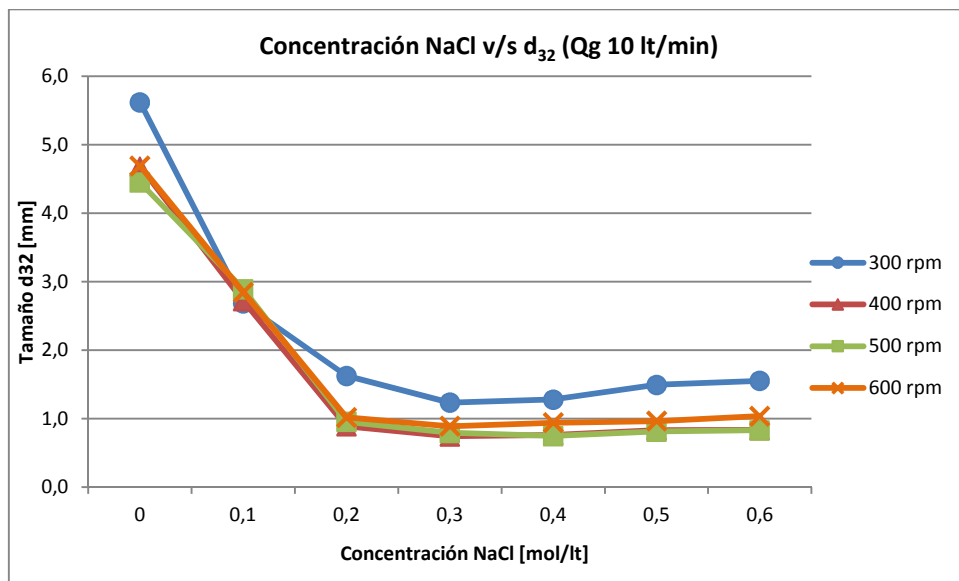


Figura 58. Curvas de coalescencia NaCl para flujo de aire nominal de 10 [lt/min] y velocidad de agitación variable.

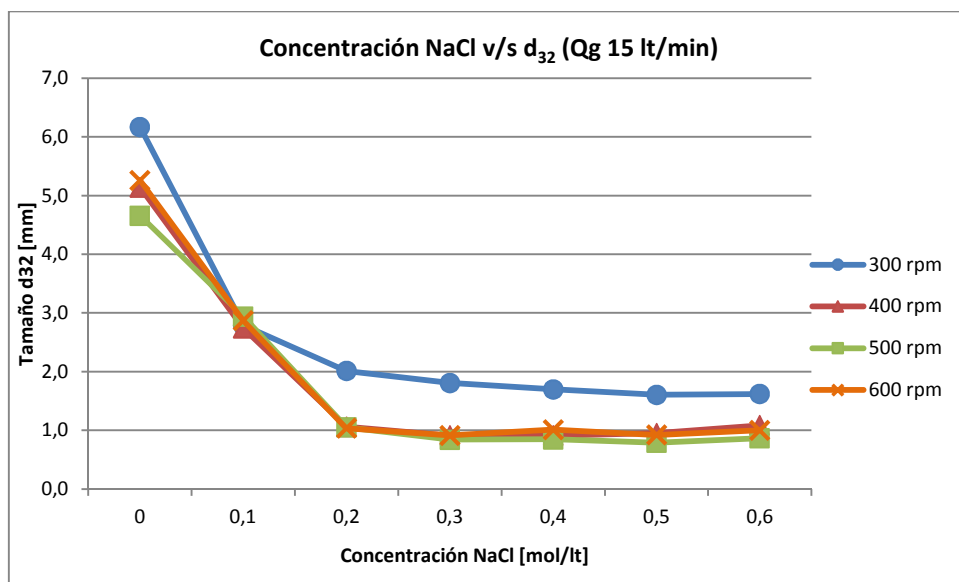


Figura 59. Curvas de coalescencia NaCl para flujo de aire nominal de 15 [lt/min] y velocidad de agitación variable.

Se observa una leve dependencia de los valores de tamaño límites d_{32} en función de la velocidad de agitación, sin embargo las diferencias no son tan significativas. En particular, para la agitación menor se obtienen curvas muy distintas, al igual que en el caso con espumante MIBC, lo que probablemente se deba a una mala dispersión de aire en la celda.

Se estudia el ajuste de las curvas de coalescencia con el modelo de Nasset en base al error cuadrático medio:

Tabla 12. Error cuadrático medio para el ajuste de las curvas de coalescencia con NaCl.

ECM	Flujo Aire Nominal		
Agitación	5	10	15
[rpm]	[lt/min]	[lt/min]	[lt/min]
300	0,11	0,24	0,02
400	0,59	0,54	0,32
500	0,89	0,68	0,55
600	0,62	0,58	0,40

El error cuadrático medio encontrado es mayor al compararlo con las curvas para MIBC, lo que se podría traducir en obtención de valores CCC95 con un mayor grado de incertidumbre. Se calcularon los valores para CCC95 los que se presentan a continuación por flujo de aire y por velocidad de agitación:

Tabla 13. Valores CCC95 para campaña experimental con NaCl.

CCC95	Flujo Aire Nominal		
[M]	5	10	15
Agitación	[lt/min]	[lt/min]	[lt/min]
[rpm]	[lt/min]	[lt/min]	[lt/min]
300	0,28	0,21	0,23
400	0,29	0,30	0,31
500	0,34	0,34	0,34
600	0,28	0,30	0,29
CCC95 Promedio	0,29		

En el caso de las curvas de coalescencia para NaCl no se observa claramente alguna tendencia para la evolución del punto CCC95 en función del flujo de aire inyectado, siendo casi constantes para una velocidad dada. Los valores mayores para CCC95 se obtienen para la velocidad de agitación 500 [rpm] y se nota una singularidad a baja agitación ya que las concentraciones críticas se vuelven menores con el aumento del flujo de aire.

Los valores encontrados para d_L son:

Tabla 14. Valores d_L para campaña experimental con NaCl.

d_L [mm]	Flujo Aire		
Agitación	5	10	15
[rpm]	[lt/min]	[lt/min]	[lt/min]
300	1,14	1,73	1,84
400	1,00	1,03	1,03
500	1,00	1,00	1,02
600	1,22	1,18	1,14
d_L Promedio	1,00		

Se observa que los valores de tamaño límite son casi constantes para velocidades de agitación y flujo de aire, encontrándose en una región acotada en torno a 1 [mm]. Sin embargo para una velocidad de agitación 300 [rpm] se aprecia una singularidad debida a la pobre dispersión de gas, ya que los valores en este caso no siguen el comportamiento del resto de las pruebas obteniéndose diámetros mayores y aumentando notablemente a mayor flujo de aire.

En una primera aproximación, estos resultados entregan algo de información sobre el comportamiento del CCC95 y d_L , observándose poca o nula relación entre estos valores y las variables operacionales. Para las pruebas realizadas con NaCl se deberá realizar un test de ANOVA para afirmar si la variabilidad de los datos es significativa con respecto a las variables operacionales de la celda de flotación.

7.4 Test ANOVA

Ante la incertidumbre de la dependencia de los valores CCC95 y d_L con las variables operacionales de la celda de flotación para los datos obtenidos en las pruebas realizadas, se decide hacer un test ANOVA para concluir sobre la varianza de los datos.

El test se realiza en Excel y se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Definición de grupos a estudiar. En este caso son las variables velocidad de agitación (RPM) y flujo de aire (Qg).
- Definición de valor α que representa el error asociado a la prueba. El valor utilizado corresponde a un 5% (valor típico).
- Cálculo de parámetro F del test ANOVA.
- Cálculo por medio de tablas estadísticas del valor crítico asociado al test.
- Concluir según:
 - Si el valor de F es mayor al valor crítico se concluye que la variabilidad de los datos es significativa.

- Si el valor de F es menor al valor crítico se concluye que la variabilidad de los datos no es significativa.

Los resultados para los valores CCC95 por cada variable operacional son:

Tabla 15. Resultado test ANOVA para parámetro CCC95 según variables operacionales. Pruebas con espumante MIBC.

Grupo	F	Valor crítico para F	Variación Significativa
Flujo de Aire (Qg)	0,2	5,14	NO
Agitación (RPM)	4,17	4,76	NO

Tabla 16. Resultado test ANOVA para parámetro CCC95 según variables operacionales. Pruebas con NaCl.

Grupo	F	Valor crítico para F	Variación Significativa
Flujo de Aire (Qg)	0,48	5,14	NO
Agitación (RPM)	13,97	4,76	SI

Los resultados para los valores d_L por cada variable operacional son:

Tabla 17. Resultado test ANOVA para parámetro d_L según variables operacionales. Pruebas con espumante MIBC.

Grupo	F	Valor crítico para F	Variación Significativa
Flujo de Aire (Qg)	1,88	5,14	NO
Agitación (RPM)	5,02	4,76	SI

Tabla 18. Resultado test ANOVA para parámetro d_L según variables operacionales. Pruebas con NaCl.

Grupo	F	Valor crítico para F	Variación Significativa
Flujo de Aire (Qg)	0,56	5,14	NO
Agitación (RPM)	4,95	4,76	SI

En general se observa que el valor de CCC95 presenta una variabilidad no significativa para las distintas variables operacionales probadas lo que se traduce en que el valor de este parámetro puede suponerse como único. Para el caso del sistema con NaCl y la variable velocidad de agitación, el resultado indica una varianza significativa la que puede deberse a que el ajuste de los valores con el modelo de Nasset es menos preciso.

Para el análisis de los tamaños mínimos generados por la celda se observa que no existe una variabilidad significativa ante cambios en el flujo de aire inyectado en la celda de flotación. Para el caso de la variable velocidad de agitación se aprecia un varianza significativa, la que sin embargo puede ser discutida debido a que los valores de F y su valor crítico son similares.

8 CAPÍTULO VIII: DISCUSIÓN ESTUDIO DE CURVAS DE COALESCENCIA

Fue posible construir las curvas de coalescencia a partir del equipo desarrollado. Las curvas entregan información sobre la concentración de reactivos en el sistema y el tamaño promedio d_{32} que se produce mediante la celda de flotación.

A partir de las curvas de coalescencia se calcularon los valores CCC95 y d_L , los cuales corresponden a la concentración de reactivo a la cual se ha reducido el 95% del tamaño inicial, y el tamaño mínimo generado en la celda, respectivamente.

8.1 Curvas Espumante MIBC

En el caso del reactivo MIBC utilizado como espumante las curvas de coalescencia se ajustan a la forma predicha por Nasset, teniendo un decaimiento exponencial del diámetro de Sauter con el aumento la concentración de MIBC.

Primeramente se observa que en la zona de la curva bajo la concentración crítica de coalescencia, los valores d_{32} son fuertemente dependientes de las variables operacionales utilizadas. Así para aumentos en el flujo de aire se obtienen aumentos en los tamaños promedios, y ante aumentos de la velocidad de agitación se sigue la tendencia de reducción en el diámetro de Sauter.

Se observa que el sistema es capaz de producir un valor límite del diámetro d_{32} en torno a 1 [mm]. Para las distintas curvas construidas (variando agitación y flujo de aire) se observa que el valor límite es similar en la mayoría de los casos. La única condición que no sigue esta tendencia es la correspondiente a una velocidad de agitación de 300 [rpm], alcanzándose un tamaño d_{32} superior a los casos de agitación mayor. Esta última observación es explicada en base a una agitación que no es capaz de dispersar de buena manera el aire inyectado en la celda y las burbujas generadas son en consecuencia de un tamaño mayor.

Es interesante notar que para el caso de una agitación demasiado baja el diámetro de Sauter mínimo que es posible alcanzar depende fuertemente de la cantidad de aire inyectado, a diferencia de los casos con velocidades mayores. A partir de esto sugiere que el tamaño d_{32} óptimo buscado en el caso de flotación de minerales requiere de una velocidad de agitación mínima que permita una dispersión de aire adecuada.

Al realizar un test ANOVA para el diámetro límite se obtiene información que confirma la poca variabilidad del d_L con el flujo de aire, siendo esta variable no significativa en el resultado del tamaño límite de burbujas. Por otro lado la velocidad de agitación presenta algún grado influencia en el tamaño límite según el test realizado, sin embargo se debe notar que este resultado se obtiene con una diferencia mínima por lo que solo se puede afirmar la dependencia de este valor con la velocidad de agitación para las pruebas realizadas en laboratorio. Así es posible que para otras condiciones de operación, por ejemplo una celda de flotación industrial, el resultado encontrado podría variar y entregar un efecto distinto. En base a lo anterior se puede afirmar que el tamaño límite generado en la celda para un sistema saturado de MIBC depende únicamente de la velocidad de agitación de la celda para las condiciones probadas en laboratorio.

Al estudiar el parámetro CCC95 se aprecia una leve dependencia con el flujo de aire inyectado a la celda, aumentando su valor al incrementarse el flujo de aire. Esto sugiere, en una primera aproximación, que el sistema necesita una mayor concentración de MIBC en presencia de un flujo de aire alto. De la misma manera, ante variaciones de la velocidad de agitación se observaron cambios en el parámetro CCC95, principalmente una disminución en estos valores ante incrementos de la agitación.

Aunque fue posible apreciar cambios en los valores CCC95, en un análisis más preciso se observa que la variabilidad de estos datos es pequeña y los resultados hallados se encuentran dentro de una región limitada de concentración de espumante MIBC. Para dilucidar sobre la influencia de las variables operacionales sobre el CCC95 se realizó un test ANOVA para el flujo de aire y velocidad de agitación, entregando como resultado una variabilidad no significativa del punto CCC95 con los parámetros mencionados. Por lo tanto, y en base a los resultados expuestos, se postula que el CCC95 para el caso con espumante MIBC es un resultado único y no depende de las variables operacionales de la celda de flotación. El valor medio encontrado de CCC95 y que se postula como único para un sistema con MIBC en la celda de laboratorio utilizada es 14,39 [ppm de MIBC].

Es interesante notar que para la velocidad de agitación 300 [rpm] se obtuvieron resultados singulares, con valores de CCC95 mucho menores, lo que se puede justificar debido a que a esta velocidad no existe una buena dispersión de aire al interior de la celda.

Al comparar los resultados obtenidos con la I -CCC conocida de trabajos anteriores, es posible notar la presencia del efecto ruptura de burbujas introducido por la agitación de la celda. En la celda de flotación es posible observar que se alcanza el valor CCC para concentraciones en torno a los 15 [ppm] de MIBC, a diferencia del caso I -CCC en donde a concentraciones de

30 [ppm] todavía no se estabiliza el valor límite. Se piensa que en el caso de distribuciones de burbujas generadas en la celda de flotación, al reducirse la coalescencia, la ruptura de burbujas toma mayor partido en la determinación del diámetro promedio, limitando su tamaño a las capacidades operativas de la celda y no a la mayor cantidad de espumante en el sistema.

8.2 Curvas NaCl

Se construyeron curvas de coalescencia utilizando NaCl como agente inhibidor de este factor. Las curvas se ajustan al modelo propuesto por Nasset pero en un grado menor que el caso con MIBC.

Se observa que en la zona de la curva bajo CCC, los diámetros de Sauter dependen fuertemente de las variables operacionales utilizadas. Para aumentos en el flujo de aire inyectado en la celda se obtienen mayores tamaños promedios, y para aumentos de la velocidad de agitación la tendencia es la reducción en el tamaño d_{32} .

En general el sistema de generación de burbujas, la celda de flotación, es capaz de producir tamaños mínimos d_{32} en torno a 1 [mm]. Estos valores se obtienen para un sistema saturado en NaCl que corresponde a una coalescencia de burbujas totalmente prevenida. El diámetro de Sauter para una velocidad de agitación baja (300 [rpm]) es superior a 1 [mm], posiblemente debido a que bajo esta agitación la dispersión de aire dentro de la celda de flotación es de mala calidad.

Al realizar un test ANOVA para el d_L se aprecia que no existe una variabilidad significativa con el flujo de aire inyectado a la celda. Por otro lado la variabilidad del d_L con la velocidad de agitación tiene algún grado de significancia, al igual que el caso MIBC, estando este resultado el límite de aprobación del test. Nuevamente se postula el que el resultado del test puede variar al cambiar las condiciones de operación (tipo de celda) pero para el caso estudiado se asume como un resultado válido. En base a esto se postula que el diámetro d_{32} límite que se genera en la celda de flotación de laboratorio en un sistema con NaCl depende únicamente de la velocidad de agitación de la celda.

Al ver los resultados obtenidos para el parámetro CCC95 no es posible definir una clara tendencia correspondiente con la variable flujo de aire, ya que los valores son similares y no muestran una evolución marcada al variar la cantidad de aire. En particular al analizar los valores de CCC95 para las velocidades de agitación 400, 500 y 600 [rpm] se aprecia que son prácticamente constantes, siendo su variabilidad mínima. Para la menor velocidad de agitación estudiada, y por ende una pobre dispersión de aire, se aprecia que el sistema necesita una menor cantidad de reactivo para

alcanzar su d_{32} límite, pero sin embargo este tamaño límite está por debajo de las capacidades probadas por la celda de flotación, es decir, es posible generar tamaños más pequeños.

Al realizar el test ANOVA para confirmar los resultados de CCC95 se observa que el flujo de aire no presenta una variabilidad significativa para los valores del punto de concentración crítica de coalescencia. Por otra parte, y al contrario de lo esperado, según el resultado del test la velocidad de agitación si presenta una varianza significativa en los resultados. Sin embargo, al analizar los datos más detalladamente se observa que el nivel de ajuste de las curvas de coalescencia con el modelo de Nasset para las pruebas con NaCl es más pobre que en el caso con MIBC, y a partir de esto el cálculo de los valores de CCC95 tiene un mayor error asociado, siendo poco confiable el resultado del ANOVA para la velocidad de agitación. Por esto, y en base a los resultados globales que se obtuvieron de las pruebas, se propone que el valor de CCC95 es único para el uso del NaCl como reductor de coalescencia. El valor medio encontrado de CCC95 y que se postula como único para un sistema con NaCl en la celda de laboratorio utilizada es 0,29 [mol/lit de NaCl].

Con relación al mayor error asociado a las pruebas con NaCl se puede hacer conexión a los hallazgos hechos en trabajos previos correspondientes a la determinación de la *I*-CCC. Ya se sabe el postulado que algunas sales, en específico NaCl, presentan un comportamiento distinto a espumantes de tipo alcoholes en la determinación de la curva de coalescencia de tipo local. Este mismo efecto podría injerir en el ajuste de las curvas de coalescencia encontradas para NaCl con el modelo de Nasset, cabiendo la posibilidad de que las curvas sigan un modelo distinto al propuesto y por consecuencia el error asociado al ajuste sea más grande que el caso MIBC.

De la misma manera que lo notado para las pruebas con MIBC, se aprecia el efecto de la agitación en el sistema en la determinación de la concentración crítica de coalescencia. Al comparar con los conocimientos previos de *I*-CCC se observa que a medida que la coalescencia disminuye al interior de la celda de flotación, la ruptura de burbujas adquiere un rol dominante limitando el tamaño promedio de burbujas a las capacidades operacionales de la celda.

9 CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se exponen las conclusiones y recomendaciones hechas en base a la investigación realizada. Se presentan divididas según: desarrollo de la técnica de medición continua por medios acústicos y el estudio realizado para la determinación del comportamiento de reactivos en base a las curvas de coalescencia.

9.1 Técnica de Medición por Medios Acústicos

Primeramente se estudió la respuesta de las burbujas ante estímulos acústicos a nivel de ultrasonido buscando encontrar una relación entre el tamaño de burbuja y su respectiva resonancia. Durante la investigación se probaron diversas configuraciones en orden de estimular una distribución de burbujas, encontrándose que la mejor de estas configuraciones es:

- Emisión a nivel de ultrasonido de una señal acústica modulada por medio de un transductor. La señal enviada interactúa con las burbujas y es recibida en la misma frecuencia de ultrasonido por un transductor ubicado a 90° del emisor.

La principal ventaja de la configuración elegida es que la medición se realiza en una banda de ultrasonido, evitando la superposición de señales a nivel audible que puedan existir en el ambiente y que ensucien la interacción con las burbujas. De esta manera la técnica evita el ruido de la sala de máquinas y la señal que se recibe es puramente resultado del encuentro con las burbujas.

Con la configuración definida se investigó la relación entre la intensidad de señal acústica y el tamaño de burbujas medido. Se utilizó como comparación la medición por análisis de imágenes, con la cual se obtuvieron las estadísticas de las distribuciones de burbujas contadas. Las mediciones se realizaron haciendo un barrido de frecuencias rescatando las intensidades producidas por las burbujas. A partir del estudio se pueden hallar las siguientes afirmaciones:

- La configuración de medición elegida permite rápidamente identificar la presencia de burbujas en el sistema, ya que éste reacciona provocando un gran aumento en la intensidad de señal recibida.
- Es posible reconocer el diámetro de burbuja en una distribución monotamaño mediante la identificación de la intensidad máxima encontrada en un barrido de frecuencias. El peak en intensidad coincide con la frecuencia correspondiente al tamaño de burbuja predicho por Minnaert.

- Es posible lograr la resonancia de una burbuja (distribución monotamaño) pero también se identifica una componente en intensidad que corresponde a reflexión de la señal incidente. De esta manera la respuesta que se obtiene se compone de:
 - Parte de la señal reflejada por las burbujas que se aprecia en todo momento.
 - Resonancia de burbuja que existe solo si coincide con el tamaño estudiado.
- Para una DTB completa no es posible identificar los tamaños posiblemente debido a que la componente de reflexión de la señal es mucho mayor, lo que provoca un apantallamiento de la resonancia de las burbujas.
- La principal variación al estudiar las DTB es el cambio en la intensidad de señal promedio que se obtiene a lo largo del barrido de frecuencias. Se escogieron variables candidatas para ajustar la variabilidad de la intensidad: contenido de aire (ε_g), cantidad de burbujas (N_b), tamaños d_{10} y d_{32} .
- La variabilidad en intensidad presenta un grado de ajuste lineal aceptable con las variables ε_g y N_b , las cuales se asocian a volumen y superficie ocupado por las burbujas respectivamente.
- El mejor ajuste se encuentra entre la intensidad promedio y el diámetro de Sauter, siendo totalmente lineal. El d_{32} incorpora información sobre el volumen ocupado por las burbujas y la superficie de burbujas disponible por lo que se postula que la dispersión de la señal depende fuertemente de la combinación de ambas características que definen la DTB.
- El modelo funciona bien hasta un tamaño máximo de 3 [mm] de diámetro. Este rango comprende los tamaños d_{32} típicos encontrados en el proceso de flotación, en donde el tamaño óptimo de burbuja fluctúa alrededor de 1 [mm]. En el caso de existir tamaños mayores al rango expuesto, el modelo no es capaz de identificar el tamaño exacto pero sí da una indicación de que es diámetro no deseado o muy grande.
- Para pruebas en sistema trifásico, con presencia de sólidos, se encuentra que la relación sigue siendo lineal pero hay que sumar el efecto de las partículas de mineral en la dispersión de la señal de audio. El efecto notado en esta investigación fue un aumento de aproximadamente 5 decibeles en intensidad.

Mediante la técnica de medición por métodos acústicos se llega a una rápida identificación del tamaño d_{32} característico de una determinada DTB. Con este valor conocido en línea se haría factible la obtención de la variable relativa al aire S_b permitiendo también incluir este parámetro que define el proceso al relacionarlo con la constante de flotación.

9.2 Curvas de Coalescencia

Se aplicó el modelo de medición por métodos acústicos encontrado para construir curvas de coalescencia para 2 tipos de reactivos usados para prevenir la coalescencia de burbujas.

Aplicando el modelo de ajuste de estas curvas propuesto por Nasset se obtuvieron los valores CCC95 que corresponde a la concentración de reactivo a la cual se ha reducido en un 95% el tamaño d_{32} original, siendo este parámetro representativo de la concentración crítica de coalescencia. También se obtuvieron los valores de los tamaños d_L correspondientes al mínimo diámetro de Sauter generado para cada curva.

9.2.1 Curvas Espumante MIBC

Con respecto al uso de espumante MIBC como agente reductor de coalescencia y la evolución del punto CCC95 se concluye:

- La adición de MIBC al sistema contribuye a la rápida reducción del tamaño de burbuja. La total prevención de coalescencia se logra para una concentración de MIBC en torno a los 15 [ppm] variando levemente según las variables operacionales.
- El sistema es capaz de generar distribuciones de tamaños de burbujas con un diámetro de Sauter límite que no depende del flujo de aire inyectado pero sí de la velocidad de agitación proporcionada por la celda de laboratorio utilizada. La reducción de tamaño va desde diámetros superiores a 4 [mm] hasta valores en torno a 1 [mm].
- No existe dependencia del CCC95 con el flujo de aire inyectado en la celda, puesto que a pesar de que se aprecian leves cambios en los valores de este parámetro la varianza resulta ser no significativa al realizar un test de ANOVA.
- No existe dependencia entre el CCC95 y la velocidad de agitación, ya que la varianza de los valores de este parámetro resulta ser no significativa. Sin embargo, según el resultado entregado por el test ANOVA, esta variable operacional tiene un mayor grado de influencia en la evolución del CCC95 que el flujo de aire.
- En consecuencia el valor CCC95 es único para el espumante MIBC y para el tipo de celda de flotación utilizada, y no depende de las variables operacionales de ésta. El valor obtenido para el CCC95 en la celda de flotación Labtech-ESSA es de 14,39 [ppm de MIBC].

Al analizar los resultados se encontró una característica particular asociada a una velocidad de agitación baja (300 [rpm]), que corresponde a un quiebre en las tendencias ya mencionadas. Ante una agitación débil no

fue posible producir un tamaño de burbujas lo suficientemente pequeño que asegure una flotación óptima, y ni siquiera saturando el sistema con espumante se lograron los diámetros requeridos. Esto indica que una velocidad de agitación demasiado lenta resulta insuficiente para dispersar el aire inyectado a la celda, el proceso primario de generación de burbujas es deficiente y se tienen tamaños indeseados.

9.2.2 Curvas NaCl

Con respecto al uso de sal NaCl como agente reductor de coalescencia y la evolución del punto CCC95 se concluye:

- La adición de NaCl al sistema favorece la reducción del tamaño de burbuja mediante la prevención de coalescencia. El punto crítico buscado se tiene a una concentración de NaCl en torno a los 0,3 [mol/lit] variando levemente según las condiciones operacionales utilizadas en la celda de flotación.
- El sistema es capaz de generar distribuciones de tamaños de burbujas con un diámetro de Sauter mínimo que se alcanza con la saturación de NaCl y una velocidad de agitación adecuada. Se aprecia una dependencia del valor d_L con la velocidad de agitación, pero no con el flujo de aire inyectado a la celda. La reducción de tamaño va desde diámetros superiores a 4 [mm] hasta valores en torno a 1 [mm].
- Con respecto a la variable flujo de aire, el punto CCC95 es casi estático para las condiciones probadas por lo tanto no es posible concluir sobre una relación entre la cantidad de aire y el punto crítico de coalescencia, por lo que se asume que su valor no depende del flujo de aire agregado a la celda. Este resultado es comprobado con la realización de un test de análisis de varianza.
- Con respecto a la variable velocidad de agitación, el valor CCC95 no muestra una relación vinculante con aumentos en las RPM. El test ANOVA realizado sugiere que existe una variabilidad significativa con este parámetro operacional, pero al no existir una tendencia clara en los valores de CCC95 con la velocidad de agitación se afirma que esta variable no influye en la evolución del punto de concentración crítica de coalescencia.
- El error asociado al ajuste de las curvas de coalescencia con el modelo de Nasset es significativo y justifica el resultado equivocado del test ANOVA del punto anterior. Este error de ajuste podría deberse a que las curvas de coalescencia para NaCl siguen una tendencia distinta en relación con los espumantes tipo alcoholes. Esta afirmación se realiza con base a observaciones de trabajos de *I-CCC* en donde se menciona esta diferencia de comportamientos.
- En consecuencia el valor CCC95 es único para el reactivo NaCl y para el tipo de celda de flotación utilizada, y no depende de las variables

operacionales de ésta. El valor obtenido para el CCC95 en la celda de flotación Labtech-ESSA es de 0,29 [mol/lt de MIBC].

De igual manera que las pruebas con MIBC, al utilizarse NaCl como agente para prevenir la coalescencia se obtienen resultados particulares al agitar el sistema con una velocidad baja de 300 [rpm]. Los diámetros de Sauter encontrados fueron muy superiores en comparación con agitaciones mayores, lo que sugiere y confirma que ante una agitación baja el aire inyectado no es capaz de dispersarse de manera correcta en una distribución de tamaños de burbujas esperada para el proceso de flotación.

En cuanto al ajuste de las curvas teóricas de Nasset con los puntos experimentales, medido como el error cuadrático medio, se puede apreciar que este valor es considerable. Si bien se logra ajustar a la forma de las curvas propuestas por el modelo, al comparar con el caso del espumante MIBC, se nota una correlación de datos más pobre. Se piensa que este hecho provoca que el resultado del test ANOVA entregue a la velocidad de agitación como una posible variable influyente en la evolución del CCC95, aunque esta conclusión es descartada debido a que no existe una clara relación entre estos valores.

9.2.3 Curvas de Coalescencia en General

En un plano más general se pueden rescatar las siguientes conclusiones sobre las curvas de coalescencia construidas:

- Se observa que el diámetro de Sauter límite d_L varía de acuerdo a incrementos en la velocidad de agitación reduciendo su valor. Por otro lado no es posible observar una influencia significativa del d_L con el flujo de aire inyectado ni con el tipo de reactivo utilizado. Por lo tanto se concluye que el tamaño d_L generado en la celda de flotación utilizada en este trabajo depende únicamente de la agitación del sistema. El valor del d_L para la celda utilizada varía en torno a 1 [mm].
- Se observa que para niveles de concentración de reactivo bajo el punto CCC el tamaño d_{32} depende de las variables operacionales flujo de aire y velocidad de agitación. En esta zona se confirma la convivencia de los procesos de ruptura y coalescencia que permiten observar estas diferencias de valores. En esta región de las curvas de coalescencia se aprecia de manera clara las tendencias:
 - A mayor flujo de aire, mayores tamaños d_{32} .
 - A mayor velocidad de agitación, menores tamaños d_{32} .
- Para concentraciones de reactivos más allá del punto CCC se obtiene un claro predominio del proceso de ruptura, ya que la coalescencia ha sido prevenida. En esta zona de la curva se puede postular que el

tamaño d_{32} es prácticamente independiente de las variables operacionales y el resultado de este valor es propio de la geometría de la celda de flotación utilizada. Sin embargo se observa que para velocidades de agitación demasiado bajas el tamaño d_{32} presenta un leve aumento debido a la pobre dispersión de aire en la celda.

- Se ha demostrado que el parámetro CCC95 es un valor complejo que no depende de las variables operacionales utilizadas. De las pruebas realizadas se concluye que el valor del CCC95 es único y depende solamente del tipo de espumante usado y de la geometría de la celda de flotación.

9.3 Recomendaciones

Si bien el prototipo se probó eficazmente para un sistema bifásico, surgen nuevas interrogantes al introducir la fase sólida al sistema las cuales pueden direccionarse en una línea de investigación complementaria para ajustar el equipo a una representación más real de medición en flotación de minerales.

Según los datos recolectados en este trabajo se recomienda estudiar el comportamiento de una DTB en sistema trifásico estudiando las siguientes características:

- Estudio del efecto de la concentración de sólidos en peso en la dispersión de la señal acústica.
- Estudio del posible efecto de la granulometría en la dispersión de la señal acústica.
- Estudio del posible efecto del tipo de mineral en la dispersión de la señal acústica.

A través de los estudios propuestos se contaría con mayor información que permitiría un correcto ajuste del equipo en base a las condiciones físicas del sistema.

Por otra parte se observó que el valor de la concentración crítica de coalescencia es propia del tipo de espumante y de la geometría de la celda de flotación, lo que implica que el resultado de CCC95 a escala de laboratorio no es posible extrapolarlo directamente a escala industrial. El valor de CCC en una planta de flotación depende principalmente del tipo de celda que se use para el proceso, sin embargo se recomienda utilizar los valores encontrados a escala de laboratorio como punto de partida para encontrar la adición de reactivos óptima en faena según la siguiente relación:

$$CCC_{PLANTA} = 1,2 \cdot CCC95_{LABORATORIO}$$

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gorain B.K., Franzidis J.P., Manlapig E.V., "Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell, part 1: effect on bubble size distribution," *Minerals Engineering*, vol. 8, no. 6, pp. 615-635, 1995.
- [2] Gorain B.K., Franzidis J.P., Manlapig E.V., "Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell, part 2: effect on gas holdup," *Minerals Engineering*, vol. 8, no. 12, pp. 1557-1570, 1995.
- [3] Gorain B.K., Franzidis J.P., Manlapig E.V., "Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell, part 3: effect on superficial gas velocity," *Minerals Engineering*, vol. 9, no. 6, pp. 639-654, 1996.
- [4] Gorain B.K., Franzidis J.P., Manlapig E.V., "Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell, part 4: effect of bubble surface area flux on flotation performance," *Minerals Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 367-379, 1997.
- [5] Gorain B.K., Napier-Munn T.J., Franzidis J.P., Manlapig E.V., "Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell, part 5: validation of k-Sb relationship and effect of froth depth," *Minerals Engineering*, vol. 11, no. 7, pp. 615-626, 1998.
- [6] F. Azgomi, C.O. Gomez, J.A. Finch, "Correspondence of gas holdup and bubble size in presence of different frothers," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 83, pp. 1-11, 2007.
- [7] R.A. Grau, K. Heiskanen, "Bubble size distribution in laboratory scale flotation cells," *Minerals Engineering*, vol. 18, pp. 1164-1172, 2005.
- [8] Nasset J.E, Hernandez-Aguilar J.R., Acuna C., Gomez C.O., Finch J.A., "Some gas dispersion characteristics of mechanical flotation machines," *Mineral Engineering*, vol. 19, pp. 807-815, 2006.
- [9] Hernandez-Aguilar, J.R., Coleman, R.G., Gomez, C.O., Finch, J.A., "A comparison between capillary and imaging techniques for," *Minerals Engineering*, vol. 17, pp. 53-61, 2004.
- [10] Gomez C.O., Finch J.A., "Gas dispersion measurements in flotation cells," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 84, pp. 51-58, 2007.
- [11] Constanza Paredes Bujes, *Determinación de la distribución de tamaño de burbujas vía análisis de imágenes: análisis y alternativas.*: Memoria

para optar al título de ingeniera civil de minas, 2012.

- [12] Clift, R., Grace, J.R. Webber, M.R., *Bubbles, drops and particles*. U.S.A.: Editorial Academic Press, 1978.
- [13] Boyd J. W. R., Varley J., "The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes," *Chemical Engineering Science*, vol. 56, no. 5, pp. 1749–1767, 2001.
- [14] Bracewell, R. N., *The Fourier Transform and Its Applications*.: McGraw-Hill, 2000.
- [15] Steve Winder, Joe Carr, *Radio and RF Engineers Pocket Book (Third Edition)*.: Newnes, 2002.
- [16] Minnaert, M., "On musical air-bubbles and the sounds of running water," *Phil. Mag.*, vol. 16, pp. 235-248, 1933.
- [17] T.G. Leighton, *The Acoustic Bubble.*, 1992.
- [18] T.G. Leighton, A.J. Walton, "An experimental study of the sound emitted from gas bubbles in a liquid," *Eur. J. Phys*, vol. 8, pp. 98-104, 1987.
- [19] P. Dawson, "The physics of the oscillating bubble made simple," *European Journal of Radiology*, vol. 41, pp. 176–178, 2002.
- [20] W. Kracht, J.A. Finch, "Using sound to study bubble coalescence," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 332, pp. 237-245, 2009.
- [21] R. Manasseh, G. Riboux, F. Risso, "Sound generation on bubble coalescence following detachment," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 34, pp. 938–949, 2008.
- [22] J.C. Buckey, Darin A. Knaus, Donna L. Alvarenga, Marc A. Kenton, Patrick J. Magari, "Dual-frequency ultrasound for detecting and sizing bubbles," *Acta Astronautica*, vol. 56, pp. 1041-1047, 2005.
- [23] T.G. Leighton, R.J. Lingard, A.J. Walton, J.E. Field, "Acoustic bubble sizing by combination of subharmonic emissions with imaging frequency," *Ultrasonics*, vol. 29, no. 4, pp. 319–323, 1991.
- [24] T.G. Leighton, A.D. Phelps, D.G. Ramble, D.A. Sharpe, "Comparison of the abilities of eight acoustic techniques to detect and size a single bubble," *Ultrasonics*, vol. 34, pp. 661-667, 1996.
- [25] Duraiswami R., Prabhukumar S., Chahine G. L., "Bubble counting

- using an inverse acoustic scattering method," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 104, no. 5, pp. 2699-2717, 1998.
- [26] H. Medwin, "Counting bubbles acoustically: a review," *Ultrasonics*, 1977.
- [27] Xiong-jun Wu, Georges L. Chahine, "Development of an acoustic instrument for bubble size distribution measurement," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 22, no. 5, pp. 330-336, 2010.
- [28] E.H. Girgin, S. Do, C.O. Gomez, J.A. Finch, "Bubble size as a function of impeller speed in a self-aeration laboratory flotation cell," *Minerals Engineering*, vol. 19, pp. 201-203, 2006.
- [29] R.A. Grau, K. Heiskanen, "Gas dispersion measurements in a flotation cell," *Minerals Engineering*, vol. 16, pp. 1081-1089, 2003.
- [30] Fernando Barona Osorio, *Influencia de la distribución de tamaño de burbujas en la recuperación de la flotación para minerales de cobre.: Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería mención Metalurgia Extractiva*, 2007.
- [31] J.J. Quinn, J.A. Finch, "On the origin of bi-modal bubble size distributions in the absence of frother," *Minerals Engineering*, 2012.
- [32] J.J. Quinn, W. Kracht, C.O. Gomez, C. Gagnon, J.A. Finch, "Comparing the effect of salts and frother (MIBC) on gas dispersion and froth properties," *Minerals Engineering*, vol. 20, pp. 1296-1302, 2007.
- [33] W. Kracht, H. Rebolledo, "Study of the local critical coalescence concentration (l-CCC) of alcohols and salts at bubble formation in two-phase systems," *Minerals Engineering*, vol. 50-51, pp. 77-82, 2013.
- [34] Grau R. A., Laskowski J. S., Heiskanen K., "Effect of frothers on bubble size," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 76, pp. 225-233, 2005.
- [35] Cho Y.S., Laskowski J.S., "Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 64, pp. 69-80, 2002.
- [36] Laskowski J.S., "Fundamental properties of flotation frothers," *Proceedings of the 22nd International Mineral Processing Congress*, pp. 788-797, 2003.
- [37] Nasset, J.E.; Finch, J.A.; Gomez, C.O., "Operating variables affecting bubble size in force-air mechanical flotation machines.," in *Proceeding of the 9th Mill Operators Conference*, Fremantle, Australia, 2007, pp.

55-65.

- [38] J.E. Nasset, W. Zhang, J.A. Finch, "A Benchmarking Tool for Assessing Flotation Cell Hydrodynamics," in *8th International Mineral Processing Seminar, Procemin*, 2011.
- [39] Wei Zhang, Jan E. Nasset, Ramachandra Rao, James A. Finch, "Characterizing Frothers through Critical Coalescence Concentration (CCC)95-Hydrophile-Lipophile Balance (HLB) Relationship," *Minerals*, vol. 2, pp. 208-277, 2012.
- [40] M. Ida, "A characteristic frequency of two mutually interacting gas bubbles in an acoustic field," *Physics Letters A*, vol. 297, pp. 210-217, 2002.
- [41] T.G. Leighton, A.J. Walton, M.J.W. Pickworth, "Primary Bjerknes Forces," *Eur J. Phys.*, vol. 11, pp. 47-50, 1990.
- [42] M. Ida, "Investigation of transition frequencies of two acoustically coupled bubbles," *J. Phys. Soc. Jpn.*, vol. 73, pp. 3026-3033, 2004.
- [43] M. Ida, "Alternative interpretation of the sign reversal of secondary Bjerknes force acting between two pulsating gas bubbles," *Phys. Rev. E*, vol. 67, 2003.
- [44] H. Rebolledo W. Kracht, "Study of the local critical coalescence concentration (l-CCC) of alcohols and salts at bubble formation in two-phase systems," *Minerals Engineering*, no. 50-51, pp. 77-82, 2013.

ANEXOS

ANEXOS A: Códigos Programados

A.1 Código Para Emisión y Recepción de Señales con Tarjeta NI Programado en C++

```
////Include//
#pragma comment(lib,"NIDAQmx.lib")
#include "NIDAQmx.h"
#include <math.h>
#include <direct.h>
#include <string.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <windows.h>
#include <process.h>
int gen_ad(void * FSN_);
int acquisition(void * FSN_);
HANDLE tPrimary, tSecond;
//Define
#define S_RATE 22050 // Tasa muestreo de los wavs
#define NIDAQ_SRATE 100000.0 // Tasa muestreo de la tarjeta
#define M_PI ((float)3.14159265)
#define BUF_SIZE 16384
#define DAQmxErrChk(functionCall) if(
DAQmxFailed(error=(functionCall)) ) goto Error; else
#define PI 3.1415926535
//Structs

static TaskHandle AItaskHandle=0,AOtaskHandle=0;
int GenSineWave(int numElements, double amplitude, double frequency,
double *phase, double sineWave[]);
static int32 GetTerminalNameWithDevPrefix(TaskHandle taskHandle,
const char terminalName[], char triggerName[]);

/**estructura header**/
typedef struct{
char riff[4];
int ChunkSize;
char Format[4];
char Subchunk1ID[4];
int Subchunk1Size;
short AudioFormat;
short NumChannels;
int SampleRate;
int ByteRate;
```



```

    short BlockAlign;
    short BitsPerSample;
    char Subchunk2ID[4];
    int Subchunk2Size;
}stHeaderWav;

/**estructura FS_NSAMPLES**/
typedef struct{
    double FS;
    long NSAMPLES;
    double frec;
    char filename [100];
}FS_NSAMPLES;

//Functions
int32 CVICALLBACK EveryNCallback(TaskHandle taskHandle, int32
everyNsamplesEventType, uInt32 nSamples, void *callbackData);
int32 CVICALLBACK DoneCallback(TaskHandle taskHandle, int32 status,
void *callbackData);

// Global variables
char directory[160];
char folder[48];
float freq_Hz, delta;
int num_files, duration;
FILE *datafile;
long int k;
double FS;
double P;
double T;
int gen_ad(void * FSN_)
{
    double FS = ((FS_NSAMPLES*)FSN_)->FS;//jz
    long total_samples = ((FS_NSAMPLES*)FSN_)->NSAMPLES;//jz
    char * fname = ((FS_NSAMPLES*)FSN_)->filename;//jz
    int f= ((FS_NSAMPLES*)FSN_)->frec;
    double f1;
    f1=(double)(f/100);

    int32 error=0;
    char errBuff[2048]='\0';
    char trigName[256];
    float64 AOdata[3000];
    float64 phase=0.0;

```

```

    datafile = fopen(fname,"w");
    k=0;
    P = 1.0/FS;
    T = 0.0;
    printf("FS = %f;\nnSamples = %d\n",FS,total_samples);

    /***/
    // DAQmx Configure Code
    /***/

    DAQmxErrChk (DAQmxCreateTask("",&AItaskHandle));
    DAQmxErrChk
    (DAQmxCreateAIVoltageChan(AItaskHandle,"Dev1/ai0","",DAQmx_Val_Cfg_
    Default,-2.0,2.0,DAQmx_Val_Volts,NULL));
    DAQmxErrChk
    (DAQmxCfgSampClkTiming(AItaskHandle","",100000.0,DAQmx_Val_Rising,D
    AQmx_Val_ContSamps,1000));
    DAQmxErrChk
    (GetTerminalNameWithDevPrefix(AItaskHandle,"ai/StartTrigger",trigName));
    DAQmxErrChk (DAQmxCreateTask("",&AOtaskHandle));
    DAQmxErrChk
    (DAQmxCreateAOVoltageChan(AOtaskHandle,"Dev1/ao0","",
    1.0,1.0,DAQmx_Val_Volts,NULL));
    DAQmxErrChk
    (DAQmxCfgSampClkTiming(AOtaskHandle","",300750.0,DAQmx_Val_Rising,D
    AQmx_Val_ContSamps,3000));
    DAQmxErrChk
    (DAQmxCfgDigEdgeStartTrig(AOtaskHandle,trigName,DAQmx_Val_Rising));

    DAQmxErrChk
    (DAQmxRegisterEveryNSamplesEvent(AItaskHandle,DAQmx_Val_Acquired_I
    nto_Buffer,1000,0,EveryNCallback,NULL)); //jz1000
    DAQmxErrChk
    (DAQmxRegisterDoneEvent(AItaskHandle,0,DoneCallback,NULL));

    //GenSineWave(1000,1.0,2.0/1000,&phase,AOdata);
    GenSineWave(3000,0.15,f1/3000,&phase,AOdata); //1.0/3000
    DAQmxErrChk (DAQmxWriteAnalogF64(AOtaskHandle, 3000, FALSE,
    10.0, DAQmx_Val_GroupByChannel, AOdata, NULL, NULL));

    /***/
    // DAQmx Start Code
    /***/
    DAQmxErrChk (DAQmxStartTask(AOtaskHandle));

```

```

    DAQmxErrChk (DAQmxStartTask(AItaskHandle));

    //printf("Acquiring samples continuously. Press Enter to
interrupt\n");

    printf("Read:\tAI\tTotal:\tAI\n");

    Sleep(duration*1000.0+800.0);
    //getchar();

    DAQmxErrChk (DAQmxClearTask(AOtaskHandle));
    DAQmxErrChk (DAQmxClearTask(AItaskHandle));
    fclose(datafile);//jz

```

Error:

```

if( DAQmxFailed(error) )
    DAQmxGetExtendedErrorInfo(errBuff,2048);
if( AItaskHandle ) {
    /******
    // DAQmx Stop Code
    /******
    DAQmxStopTask(AItaskHandle);
    DAQmxClearTask(AItaskHandle);
    AItaskHandle = 0;
}
if( AOtaskHandle ) {
    /******
    // DAQmx Stop Code
    /******
    DAQmxStopTask(AOtaskHandle);
    DAQmxClearTask(AOtaskHandle);
    AOtaskHandle = 0;
}
if( DAQmxFailed(error) )
    printf("DAQmx Error: %s\n",errBuff);
//printf("End of program, press Enter key to quit\n");
//getchar();
return 0;
}

```

```

int32 CVICALLBACK EveryNCallback(TaskHandle taskHandle, int32
everyNsamplesEventType, uInt32 nSamples, void *callbackData)
{
    int32 error=0;
    char errBuff[2048]={'\0'};

```

```

static int totalAI=0;
int32     readAI=0;
float64   AIdata[1000];
    int i;
    /***/
    // DAQmx Read Code
    /***/
    DAQmxErrChk
(DAQmxReadAnalogF64(AItaskHandle,1000,10.0,DAQmx_Val_GroupByChan
nel,AIdata,1000,&readAI,NULL));

    if( readAI>0 ) {
        //printf("Acquired          %d          samples.          Total
%d\r",readAI,totalAI+=readAI);
        //printf("\n");
        for (i=0;i<1000;i++){
            k++;
            fprintf(datafile,"%f\t%f\n",T,AIdata[i]);
            T+=P;
        }
    }

    printf("\t%d\t\t%d\r",readAI,totalAI+=readAI);

    fflush(stdout);

```

Error:

```

if( DAQmxFailed(error) ) {
    DAQmxGetExtendedErrorInfo(errBuff,2048);
    /***/
    // DAQmx Stop Code
    /***/
    if( AItaskHandle ) {
        DAQmxStopTask(AItaskHandle);
        DAQmxClearTask(AItaskHandle);
        AItaskHandle = 0;
    }
    if( AOTaskHandle ) {
        DAQmxStopTask(AOTaskHandle);
        DAQmxClearTask(AOTaskHandle);
        AOTaskHandle = 0;
    }
}

```

```

        printf("DAQmx Error: %s\n",errBuff);
    }
    return 0;
}

```

```

int32 CVICALLBACK DoneCallback(TaskHandle taskHandle, int32 status,
void *callbackData)
{
    int32 error=0;
    char errBuff[2048]={'\0'};

    // Check to see if an error stopped the task.
    DAQmxErrChk (status);

```

Error:

```

    if( DAQmxFailed(error) ) {
        DAQmxGetExtendedErrorInfo(errBuff,2048);
        DAQmxClearTask(taskHandle);
        if( AITaskHandle ) {
            DAQmxStopTask(AITaskHandle);
            DAQmxClearTask(AITaskHandle);
            AITaskHandle = 0;
        }
        if( AOTaskHandle ) {
            DAQmxStopTask(AOTaskHandle);
            DAQmxClearTask(AOTaskHandle);
            AOTaskHandle = 0;
        }
        printf("DAQmx Error: %s\n",errBuff);
    }
    return 0;
}

```

```

int GenSineWave(int numElements, double amplitude, double frequency,
double *phase, double sineWave[])
{
    int i=0;

    for(;i<numElements;++i)
        //sineWave[i] =
        amplitude*sin(PI/180.0*(*phase+360.0*frequency*i));
        sineWave[i] = amplitude*sin(PI/180.0*(360.0*frequency*i));

    return 0;
}

```

```

static int32 GetTerminalNameWithDevPrefix(TaskHandle taskHandle,
const char terminalName[], char triggerName[])
{
    int32 error=0;
    char device[256];
    int32 productCategory;
    uInt32 numDevices,i=1;

    DAQmxErrChk
(DAQmxGetTaskNumDevices(taskHandle,&numDevices));
    while( i<=numDevices ) {
        DAQmxErrChk
(DAQmxGetNthTaskDevice(taskHandle,i++,device,256));
        DAQmxErrChk
(DAQmxGetDevProductCategory(device,&productCategory));
        if( productCategory!=DAQmx_Val_CSeriesModule &&
productCategory!=DAQmx_Val_SCXIModule ) {
            *triggerName++ = '/';

            strcat(strcat(strcpy(triggerName,device),"/"),terminalName);
            break;
        }
    }

    Error:
    return error;
}

```

//crea wav de "freq_Hz" [Hz] de frecuencia, duracion igual a "duration" [segundos] y nombre "name"

```

void create_wav(float freq_Hz, int duration, char * name)
{
    int i, j, k;
    float amplitude = 32000;
    short buffer[BUF_SIZE];
    int dur = (duration)*S_RATE+4410;
    int n_buffers = dur/BUF_SIZE;
    int rest = dur%BUF_SIZE;

    FILE * archivo_wav;
    float phase=0;

```

```

float freq_radians_per_sample = freq_Hz*2*M_PI/S_RATE;
int file_length=44+2*dur; //header(44) + (bytes per sample)*(num
samples)

//Asignacion
/**Header**
stHeaderWav st;
strcpy(st.riff,"RIFF");
st.ChunkSize=file_length-8;
strcpy(st.Format,"WAVE");
strcpy(st.Subchunk1ID,"fmt ");
st.Subchunk1Size=16;
st.AudioFormat=1;
st.NumChannels=1;
st.SampleRate=S_RATE;
st.ByteRate=st.SampleRate * st.NumChannels * 2;
st.BlockAlign= st.NumChannels * 2;
st.BitsPerSample=16;
strcpy(st.Subchunk2ID,"data");
st.Subchunk2Size= dur*st.NumChannels*st.BitsPerSample/8;

/** Variables auxiliares **
//buffer = (short*)malloc(sizeof(short)*num_samples);

archivo_wav=fopen(name,"wb");

//Escritura
/** Header **
//jz      aqui      crea      archivos      wav
fwrite(&st,sizeof(stHeaderWav),1,archivo_wav);

/** Data **
k=0;
for (i=0; i<n_buffers; i++)
{
    for (j=0; j<BUF_SIZE;j++){
        buffer[j] =
(short)(amplitude*sin(k*freq_radians_per_sample));
        k++;
    }
    fwrite(buffer,2,BUF_SIZE,archivo_wav);
}

for(j=0;j<rest;++j){
    buffer[j] = (short)(amplitude*sin(k*freq_radians_per_sample));

```

```

        k++;
    }
    fwrite(buffer,2,rest,archivo_wav);

    fclose(archivo_wav);
}

//genera "n_files" wavs (de duracion = "duration") partiendo desde desde
"freq",
//aumentando "delta_freq" en cada archivo consecutivo.
void create_wavs(float freq, float delta_freq, int n_files, int duration,
const char * path_, const char * folder_){

    int i;
    char file_name[25];
    char aux[6];
    char aux2[50];

    //change path
    chdir(path_);

    //create folder
    mkdir(folder_);

    strcpy(aux2,"./");
    strcat(aux2,folder_);

    //change path to aux2
    chdir(aux2);

    mkdir("Wavs");
    mkdir("Resultados");

    chdir("./Wavs"); // .../folder_/Wavs

    //generate wav files in path:aux2
    for (i = 0; i<n_files;i++){

        strcpy(file_name,"Signal ");
        itoa (freq,aux,10);
        strcat(file_name,aux);
        strcat(file_name," [Hz].wav");
    }
}

```



```

        create_wav(freq, duration, file_name);
        //printf("%s\n",file_name);
        freq += delta_freq;
    }
    chdir("..");
}

//lee archivo de configuracion de nombre "config_file" y ejecuta
int read_config(char * config_file)
{
    //DECLARACIONES
    FILE *config;
    char aux[160];

    //SE ABRE ARCHIVO
    if( (config=fopen(config_file, "rt"))==NULL)
    {
        printf("No fue posible abrir el archivo: %s\n",config_file);
        getchar();
        return -1;
    };

    //SE ESCANEA ARCHIVO

    // 1. Leer frecuencia
    fscanf(config, "%s", &aux);
    if((strcmp("[Frecuencia_inicio]",aux))==0)
    {
        fscanf(config, "%s", &aux);
        freq_Hz=atof(aux);
        printf("[Frecuencia_inicio]: %f [Hz]\n", freq_Hz);
    }
    else{
        printf("Error al leer frecuencia\n");
        printf("Archivo no sigue formato correcto: [Frecuencia_inicio]
XX\n");
        getchar();
        return -1;
    }

    //2. Leer duracion de cada señal
    fscanf(config, "%s", &aux);
    if((strcmp("[Duracion_wavs]",aux))==0)
    {

```

```

        fscanf(config, "%s", &aux);
        duration = atoi(aux);
        printf("[Duracion_wavs]: %d [s]\n",duration);
    }
    else{
        printf("Error al leer duracion\n");
        printf("Archivo no sigue formato correcto: [Duracion_wavs]
XX\n");
        getchar();
        return -1;
    }

//3. Leer salto en frecuencia
fscanf(config, "%s", &aux);
if((strcmp("[Salto_frecuencia]",aux))==0)
{
    fscanf(config, "%s", &aux);
    delta = atof(aux);
    printf("[Salto_frecuencia]: %f\n",delta);
}
else{
    printf("Error al leer Delta de Frecuencia\n");
    printf("Archivo no sigue formato correcto:
[Salto_frecuencia] XX\n");
    getchar();
    return -1;
}

//4. Leer numero de archivos
fscanf(config, "%s", &aux);
if((strcmp("[Numero_archivos_generar]",aux))==0)
{
    fscanf(config, "%s", &aux);
    num_files = atoi(aux);
    printf("[Numero_archivos_generar]: %d\n",num_files);
}
else{
    printf("Error al leer Numero de archivos\n");
    printf("Archivo no sigue formato correcto:
[Numero_archivos_generar] XX\n");
    getchar();
    return -1;
}

//5. Leer directorio

```

```

fscanf(config, "%s", &aux);
if((strcmp("[Path_wavs]",aux))==0)
{
    fscanf(config, "%[^\\n]", &aux);
    strcpy(directory,&aux[1]);
    printf("[Path_wavs]: %s\\n",directory);
}
else
{
    printf("Error al leer Directorio\\n");
    printf("Archivo no sigue formato correcto: [Path_wavs]
C:...\\n");
    getchar();
    return -1;
}

//6. Leer nombre carpeta (nombre experimento)

fscanf(config, "%s", &aux);
if((strcmp("[Nombre_experimento]",aux))==0)
{
    fscanf(config, "%[^\\n]", &aux);
    strcpy(folder,&aux[1]);
    printf("[Nombre_experimento]: %s\\n",folder);
}
else
{
    printf("Error al leer Directorio\\n");
    printf("Archivo no sigue formato correcto:
[Nombre_experimento] xx - xx - xx\\n");
    getchar();
    return -1;
}

fclose(config);

return 0;

// FIN LECTURA
}

void wav_name(int freq, wchar_t * name_aux ){

char aux [6];

```

```

char name [104];
strcpy(name, ".\\Wavs\\Signal ");
itoa (freq,aux,10);
strcat(name,aux);
strcat(name, " [Hz].wav");
mbstowcs(name_aux,name,100);
}

```

```

void output_name(int freq, char * name_aux ){

char aux [6];
char name [104];
strcpy(name, ".\\Resultados\\Respuesta ");
itoa (freq,aux,10);
strcat(name,aux);
strcat(name, " [Hz].txt");
strcpy(name_aux,name);

}

```

```

int main()
{
    DWORD ThreadID1;
    DWORD ThreadID2;
    //create_wav(220,11,"Cristalino.wav");

    int i;
    float freq_;

    //FILE * fp = fopen(".\\Hola\\Birras.txt","wb");
    wchar_t name1 [100];

    FS_NSAMPLES FSN;
    FSN.FS = NIDAQ_SRATE;

    if(read_config("config_test.txt")!=0) {getchar();return -1;}

    freq_ = freq_Hz;
    FSN.NSAMPLES = (long)(NIDAQ_SRATE*duration);

    create_wavs(freq_Hz, delta, num_files, duration, directory, folder);
}

```

```

    FSN.freq = freq_;
    for (i=0;i<num_files;i++){

        wav_name(freq_,name1);
        output_name(freq_,FSN.filename);
        printf("\n");
        printf("%S\n",name1);
        gen_ad(&FSN);

        Sleep((duration+1)*1000 +1200);
        freq_ += delta;
        FSN.freq = freq_;
        printf("\n");
    }

    return 0;
    getchar();
}

```

A.2 Código Para Análisis de Señales Programado en Matlab

```

function MatrizArmonicos = CalcularArmonicos(ruta, freq, nArchivos,
salto, nArmonicos)

```

```

    MatrizArmonicos = zeros(nArchivos,nArmonicos,3);

    for i=1:nArchivos

        r=load(strcat([ruta '\ 'Respuesta ' num2str(freq) ' [Hz].txt']));

        f = abs(fft(r(:,2)));

        f=f(1:round(length(f)/2));

        MatrizArmonicos(i,,:) = AuxArm(f,freq, nArmonicos);

        freq = freq + salto;

    end

end

```

ANEXOS B: Configuraciones Descartadas

B.1 Pruebas Resonancia Heterodina

A continuación se reportan los resultados obtenidos en la configuración resonancia heterodina de burbujas separados según su configuración espacial en ortogonal y LOS, además se mencionan las condiciones en las cuales las pruebas fueron realizadas.

B.1.1 Pruebas en configuración espacial ortogonal

10.1.1.1 B.1.1.1 Prueba 1

Se realizan mediciones para 3 frecuencias de excitación distintas siendo una de ellas la que corresponde a la frecuencia correspondiente al tamaño de burbujas que se generan. Las condiciones de operación en esta prueba son:

Tabla 19. Condiciones prueba 1 configuración heterodina en ortogonal.

Condiciones	
Distribución de tamaño de burbuja	Monotamaño 2 (correspondiente a 2,6 [kHz] medido en la generación de la burbuja)
Sistema captura de datos	Software SpectraPLUS
Frecuencias de excitación aplicadas	1,3 [kHz] – 2,6 [kHz] – 5,2 [kHz] (con modulación AM)
Intensidad de señal aplicada	10 [Volts peak to peak]
Disposición espacial	Hidrófono en ortogonal al transductor emisor

Los resultados son:

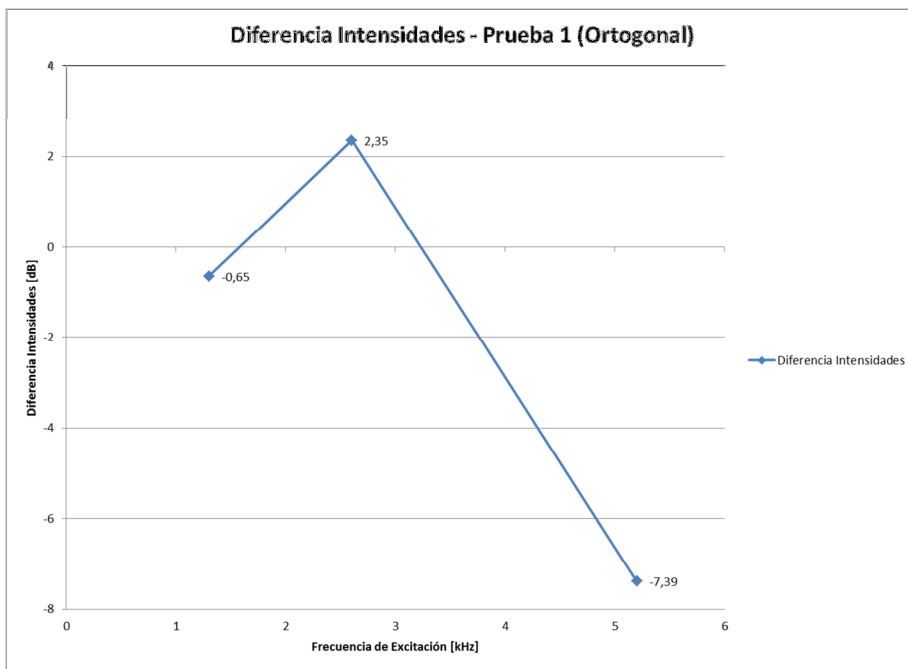
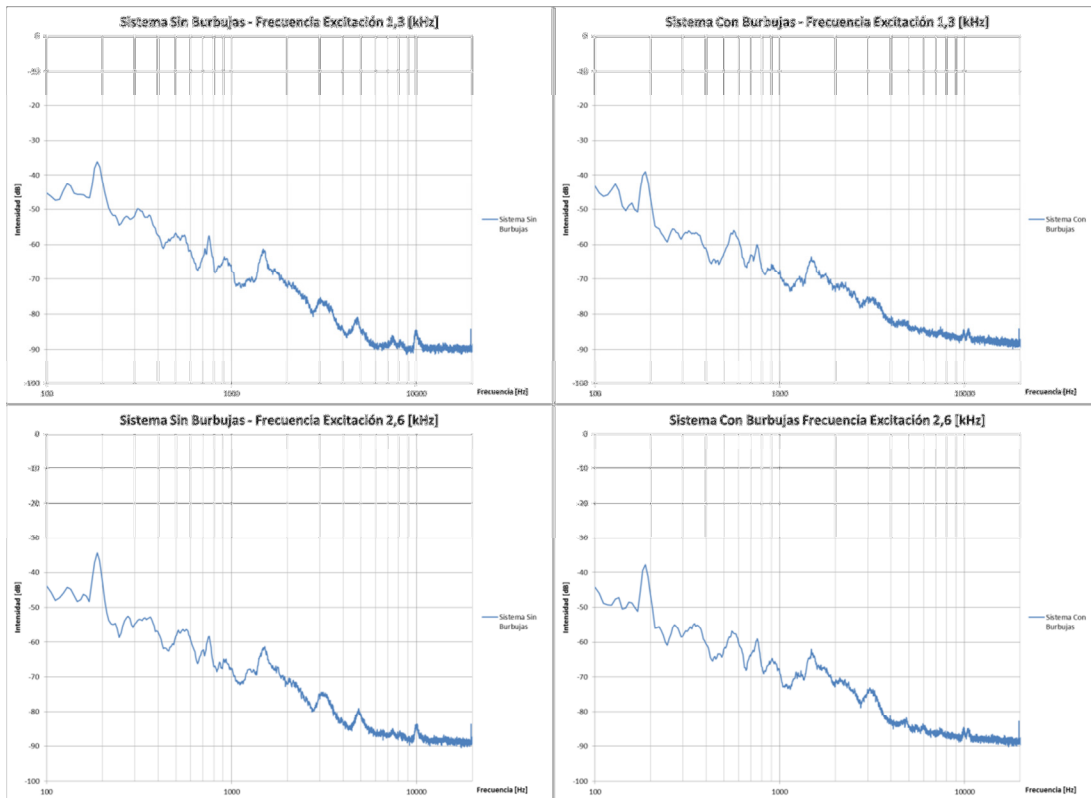


Figura 60. Resultados prueba 1 configuración heterodina en ortogonal.

Los espectros de frecuencia completos se presentan a continuación:



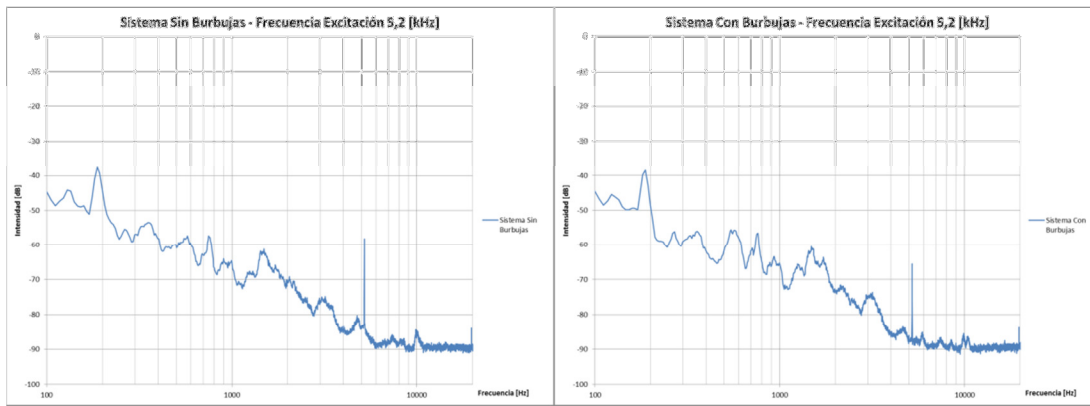


Figura 61. Espectros de frecuencia prueba 1 configuración heterodina en ortogonal, sistemas con y sin burbujas.

B.1.2 Pruebas en configuración espacial en línea de vista (LOS)

10.1.1.2 B.1.2.1 Prueba 1

Se realizan mediciones para 3 frecuencias de excitación distintas siendo una de ellas la que corresponde a la frecuencia correspondiente al tamaño de burbujas que se generan. Las condiciones de operación en esta prueba son:

Tabla 20. Condiciones prueba 1 configuración heterodina en LOS.

Condiciones	
Distribución de tamaño de burbuja	Monotamaño 2 (correspondiente a 2,6 [kHz] medido en la generación de la burbuja)
Sistema captura de datos	Software SpectraPLUS
Frecuencias de excitación aplicadas	1,3 [kHz] – 2,6 [kHz] – 5,2 [kHz] (con modulación AM)
Intensidad de señal aplicada	10 [Volts peak to peak]
Disposición espacial	Hidrófono en LOS al transductor emisor

Los resultados son:

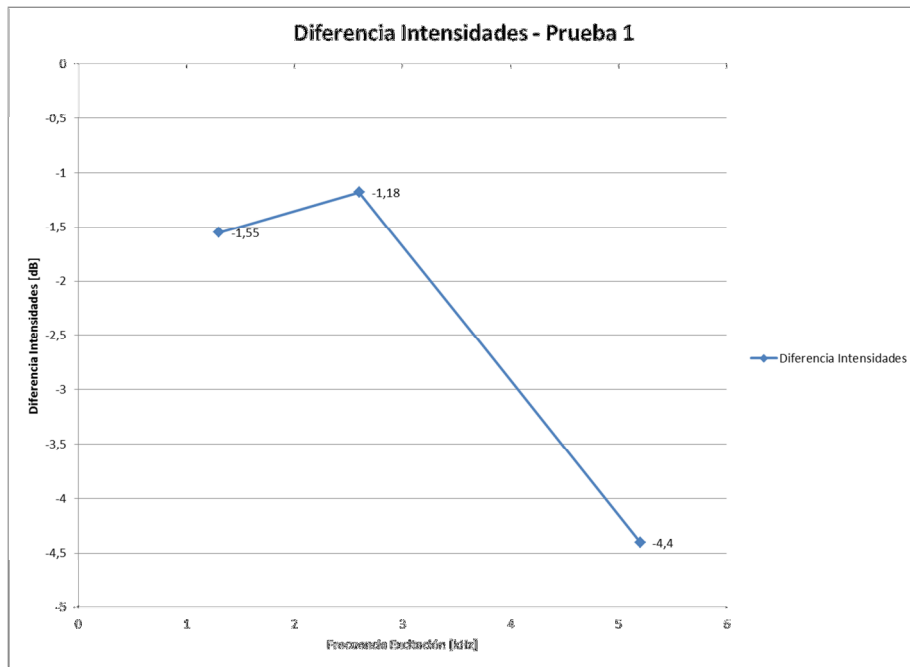
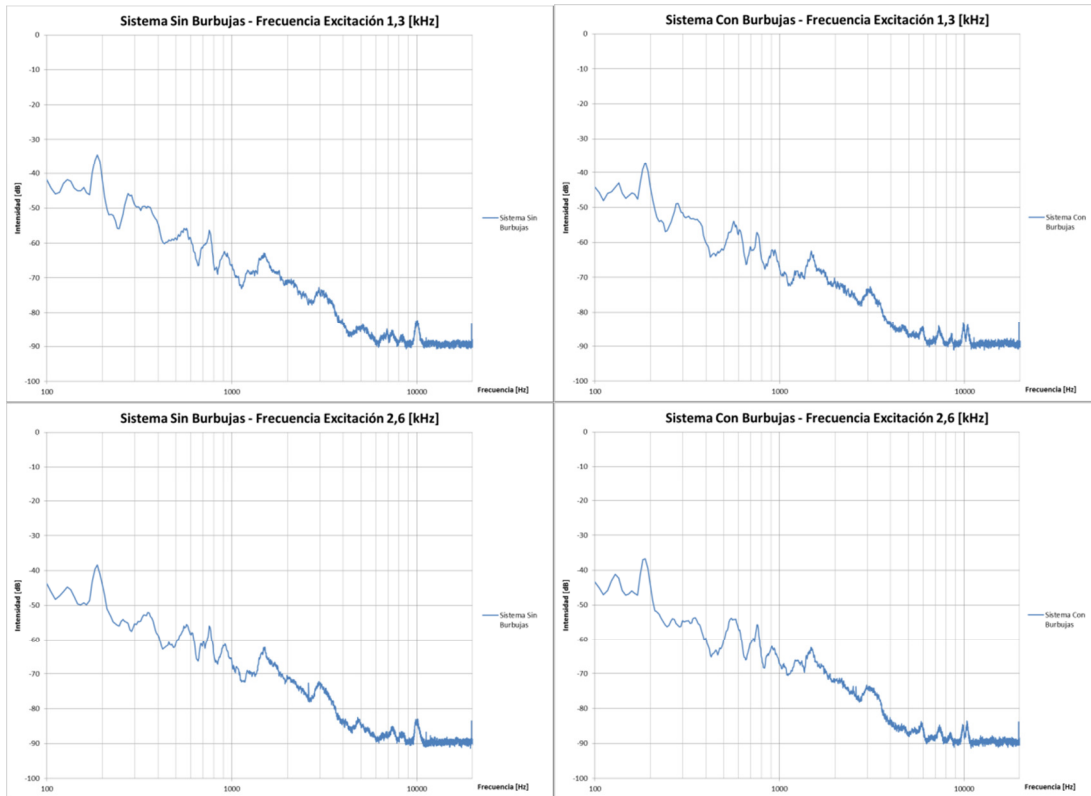


Figura 62. Resultados prueba 1 configuración heterodina en LOS.

Los espectros de frecuencia completos se presentan a continuación:



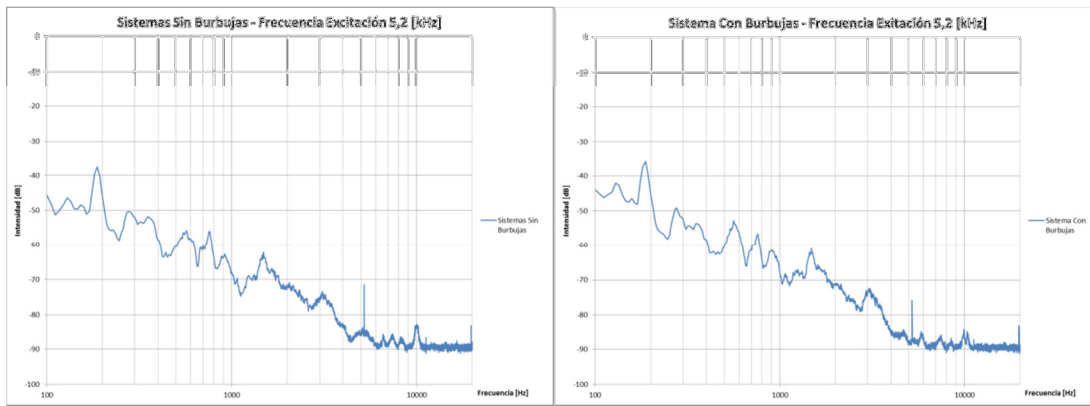


Figura 63. Espectros de frecuencia prueba 1 configuración heterodina en LOS, sistemas con y sin burbujas.

B.2 Resonancia Heterodina Inversa

A continuación se reportan los resultados obtenidos en la configuración del esquema modificado de resonancia heterodina de burbujas en configuración espacial ortogonal.

B.2.1 Pruebas en configuración espacial ortogonal

10.1.1.3 B.2.1.1 Prueba 1

Se realizan mediciones para un barrido de frecuencias distintas para sistemas con y sin burbujas. Las condiciones de operación en esta prueba son:

Tabla 21. Condiciones prueba 1 configuración heterodina inversa en ortogonal.

Condiciones	
Distribución de tamaño de burbuja	DTB 1 (correspondiente a una distribución de tamaños generada en la celda de flotación)
Sistema captura de datos	Tarjeta NI, código Matlab
Frecuencias de excitación aplicadas	Barrido de 1 [kHz] a 10 [kHz] a intervalos de 1[kHz]
Intensidad de señal aplicada	30 [Volts peak to peak]
Disposición espacial	Transductor receptor en ortogonal al transductor emisor y en LOS con tweeter.

Los resultados son:

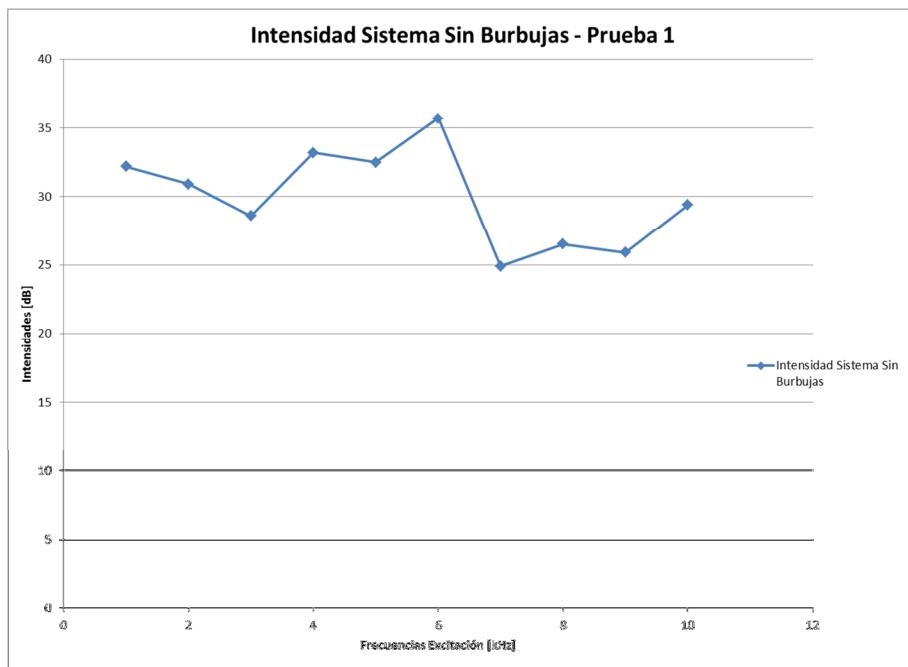


Figura 64. Resultados prueba 1 configuración heterodina inversa en ortogonal sistema sin burbujas.

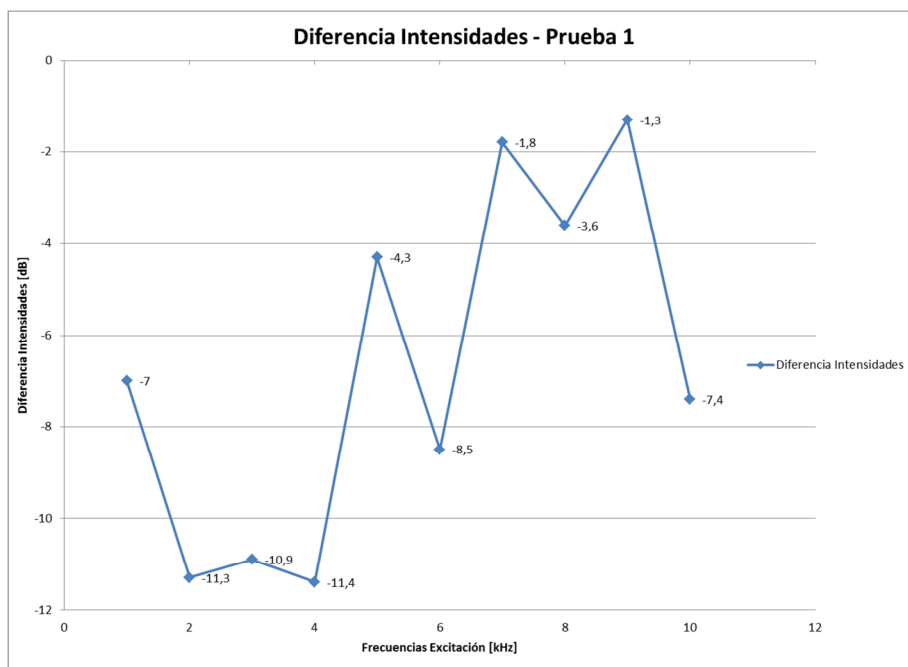


Figura 65. Resultados prueba 1 configuración heterodina inversa en ortogonal.

10.1.1.4 B.2.1.2 Prueba 2

Se realizan mediciones para un barrido de frecuencias distintas para sistemas con y sin burbujas. Las condiciones de operación en esta prueba son:

Tabla 22. Condiciones prueba 2 configuración heterodina inversa en ortogonal.

Condiciones	
Distribución de tamaño de burbuja	DTB 1 (correspondiente a una distribución de tamaños generada en la celda de flotación)
Sistema captura de datos	Software SpectraPLUS
Frecuencias de excitación aplicadas	Barrido de 1 [kHz] a 10 [kHz] a intervalos de 1[kHz]
Intensidad de señal aplicada	30 [Volts peak to peak]
Disposición espacial	Transductor receptor en ortogonal al transductor emisor y en LOS con tweeter.

Los resultados son:

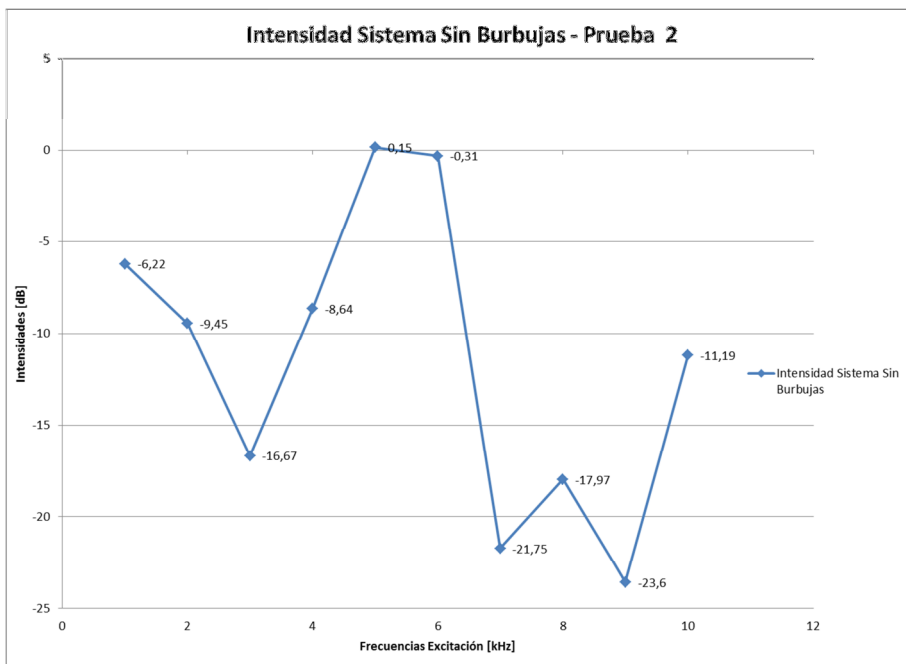


Figura 66. Resultados prueba 2 configuración heterodina inversa en ortogonal sistema sin burbujas.

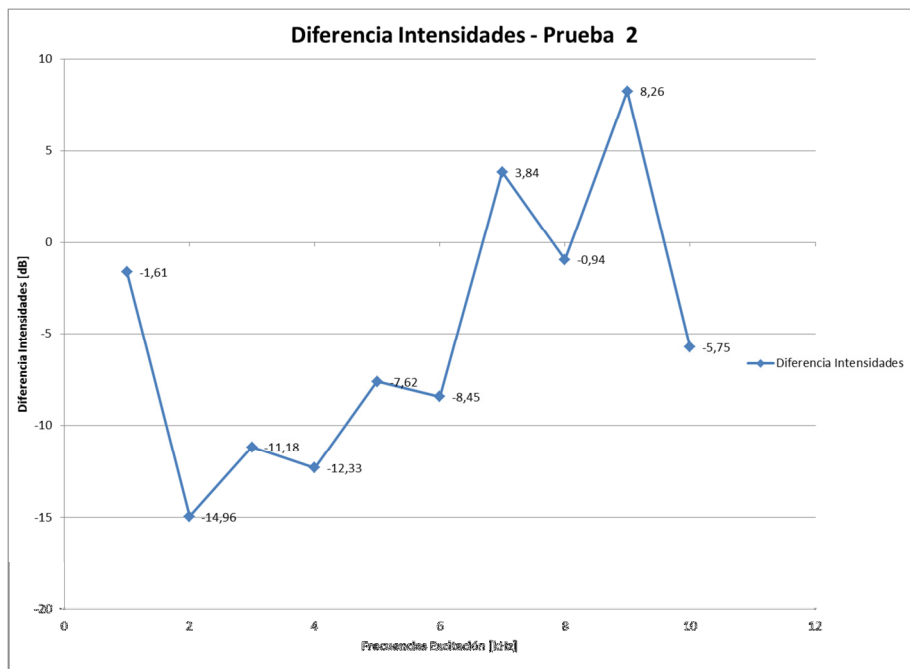


Figura 67. Resultados prueba 2 configuración heterodina inversa en ortogonal.

10.1.1.5 B.2.1.3 Prueba 3

Se realizan mediciones para un espectro de frecuencias aplicado como un COMB o una peineta de peaks espectrales a sistemas con y sin burbujas. Las condiciones de operación en esta prueba son:

Tabla 23. Condiciones prueba 3 configuración heterodina inversa en ortogonal.

Condiciones	
Distribución de tamaño de burbuja	DTB 1 (correspondiente a una distribución de tamaños generada en la celda de flotación)
Sistema captura de datos	Software SpectraPLUS
Frecuencias de excitación aplicadas	Espectro de frecuencias COMB de 500 [Hz] a 18 [kHz]
Intensidad de señal aplicada	30 [Volts peak to peak]
Disposición espacial	Transductor receptor en ortogonal al transductor emisor y en LOS con tweeter.

Los resultados para el sistema sin burbujas son:

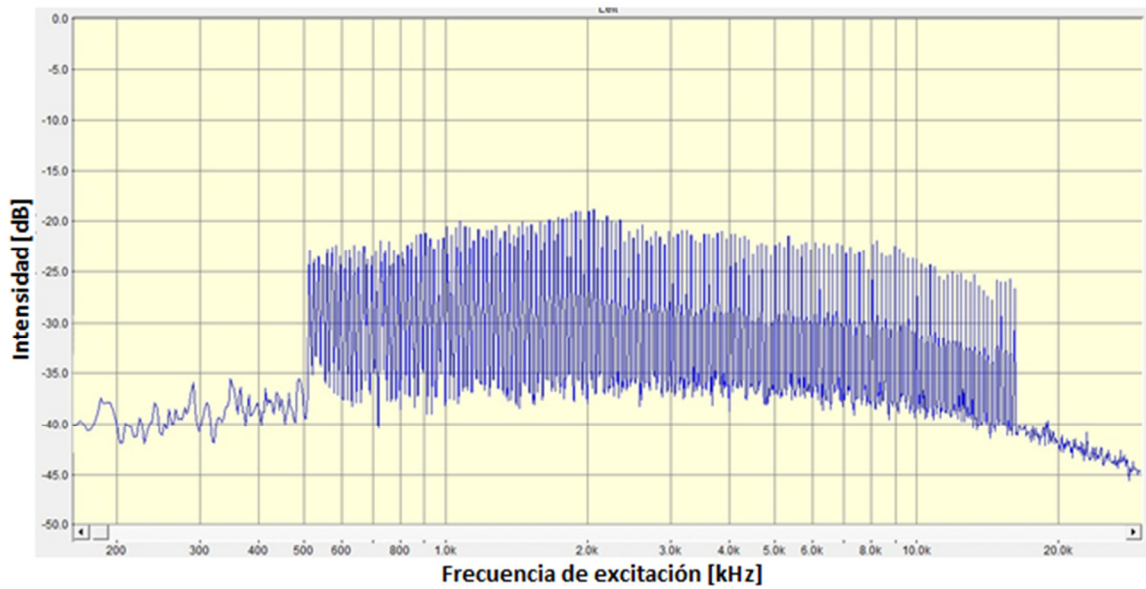


Figura 68. Resultados prueba 3 configuración heterodina inversa en ortogonal sistema sin burbujas.

Los resultados para el sistema con burbujas son:

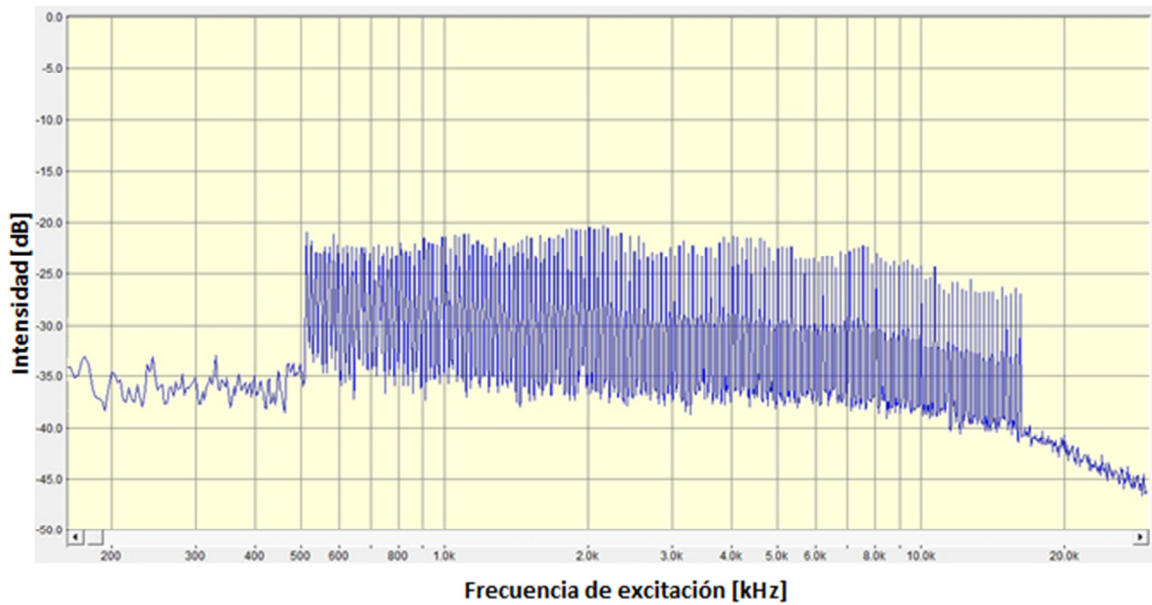


Figura 69. Resultados prueba 3 configuración heterodina inversa en ortogonal sistema con burbujas.

Los resultados obtenidos con el esquema de resonancia heterodina inversa no fueron promisorios, por lo tanto la configuración se descartó rápidamente.

ANEXOS C: Resultados Modelo Intensidad de Señal y DTB

C.1 Calibración Rotámetro

Para conocer el flujo real de aire en el interior de la celda se calibró el rotámetro mediante el método de la probeta invertida para 4 distintos valores de flujo de aire a valor nominal. Se obtuvo la siguiente relación:

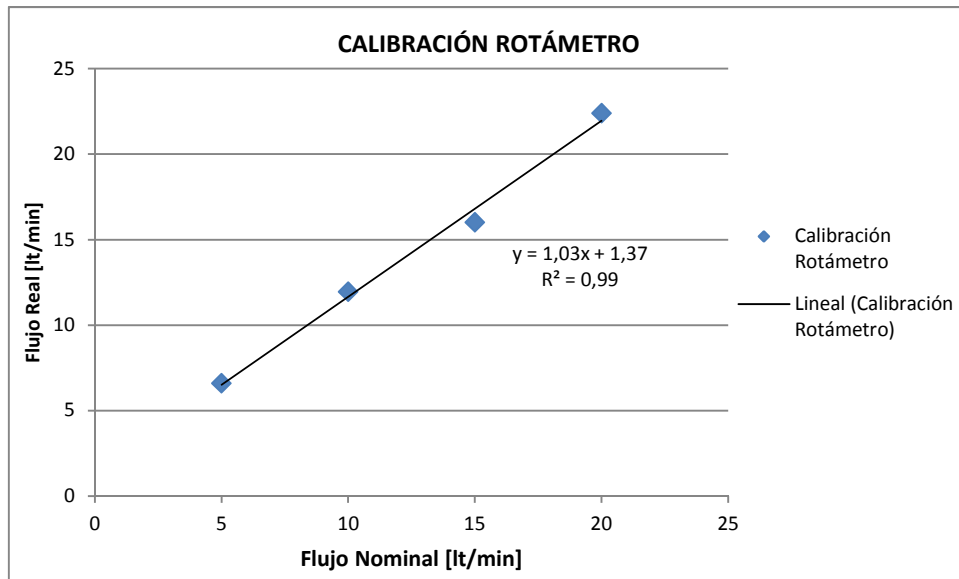


Figura 70. Curva calibración rotámetro.

La ecuación que encontrada es la siguiente:

$$Q_{real} = 1,03 \cdot Q_{nominal} + 1,37 \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

Q_{real} : flujo de aire efectivo inyectado a la celda de flotación en [lt/min].

$Q_{nominal}$: flujo de aire indicado en por la celda de flotación en [lt/min].

C.2 Variables Descartadas Para Construcción del Modelo

Los valores de las variables candidatas N_b , ϵ_g y d_{10} se calcularon de manera tradicional mediante el análisis de imágenes. Al comparar con los datos recolectados con la técnica de medición acústica se obtienen los siguientes resultados:

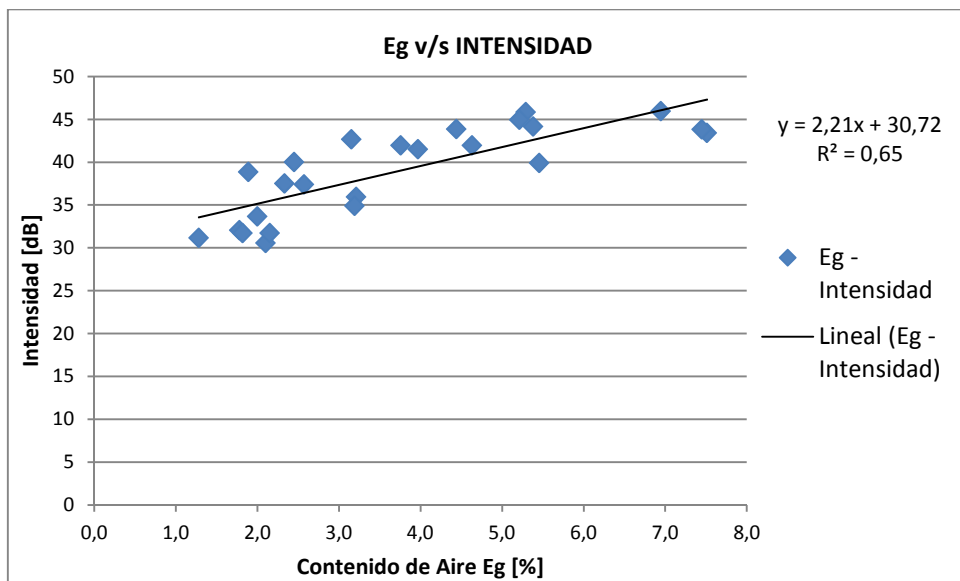


Figura 71. Relación contenido de aire e intensidad se señal acústica.

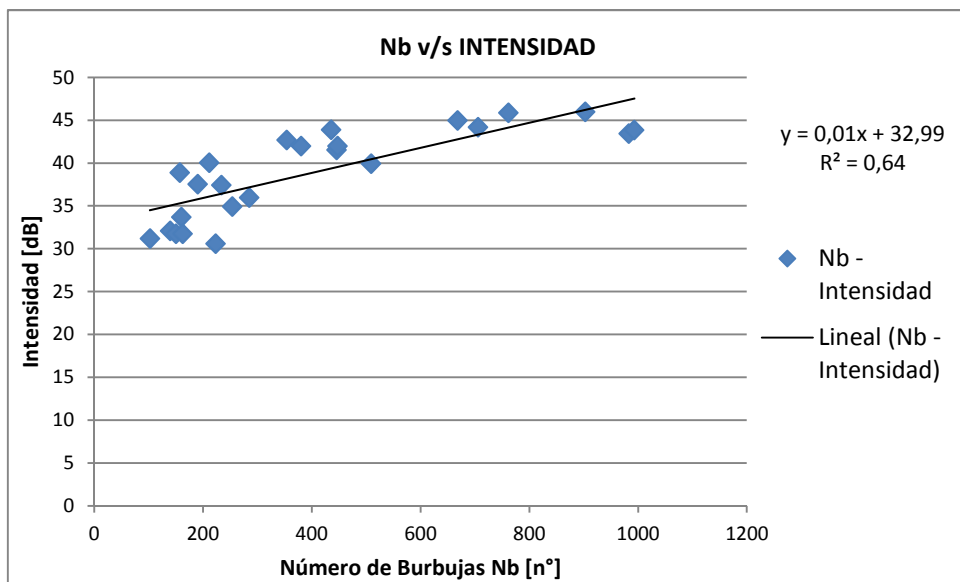


Figura 72. Relación número de burbujas e intensidad de señal acústica.

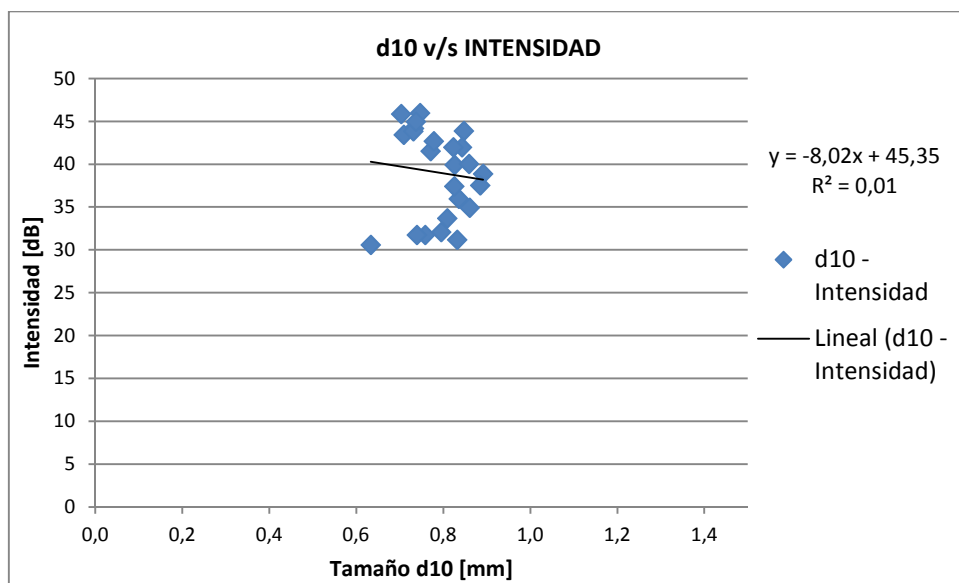


Figura 73. Relación diámetro d10 e intensidad de señal acústica.

C.3 Pruebas Construcción Modelo (Sistema Bifásico)

Tabla 24. Resultados construcción del modelo: intensidad acústica y diámetro d_{32} medido por análisis de imágenes.

Velocidad de Agitación [rpm]	Flujo de Aire [lt/min]	Set de Mediciones 1		Set de Mediciones 2		Set de Mediciones 3	
		Intensidad Acústica [dB]	d_{32} Análisis de Imágenes [mm]	Intensidad Acústica [dB]	d_{32} Análisis de Imágenes [mm]	Intensidad Acústica [dB]	d_{32} Análisis de Imágenes [mm]
300	5	32,08	1,72	31,20	1,53	31,74	1,73
	10	30,59	1,85	33,71	1,61	31,75	1,84
400	5	35,99	1,34	40,06	1,33	38,88	1,25
	10	34,91	1,48	37,45	1,39	37,53	1,40
500	5	41,53	1,09	43,89	1,08	42,70	1,08
	10	39,92	1,28	42,00	1,15	41,97	1,12
600	5	44,19	0,91	45,99	0,89	45,86	0,89
	10	43,45	1,07	43,86	0,92	44,96	0,99

C.3.1 Set de Mediciones 1

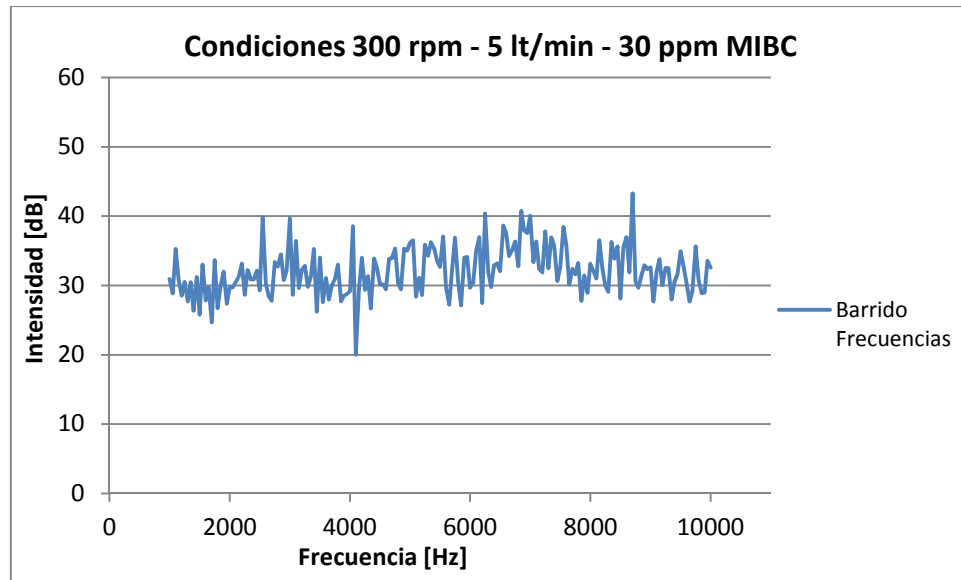


Figura 74. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

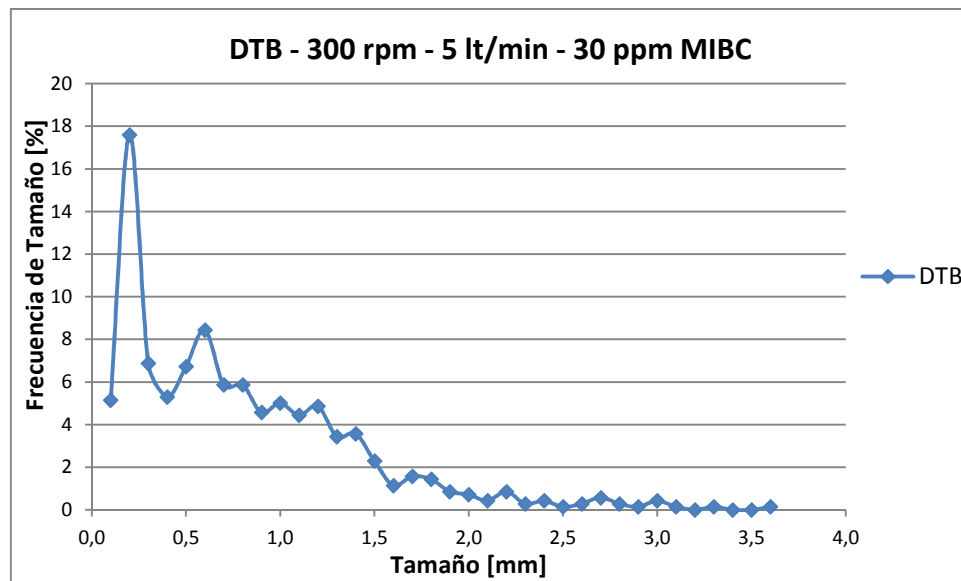


Figura 75. DTB para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

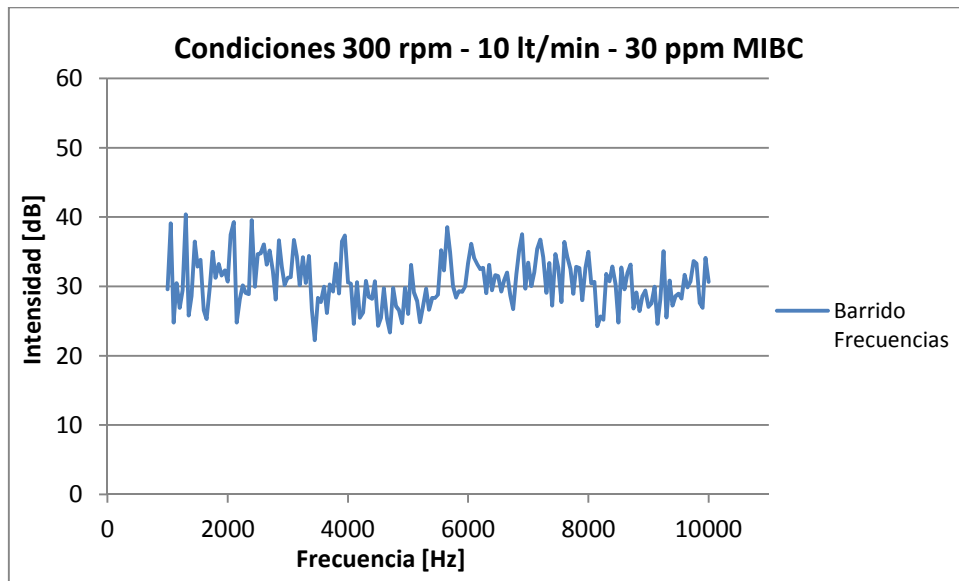


Figura 76. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

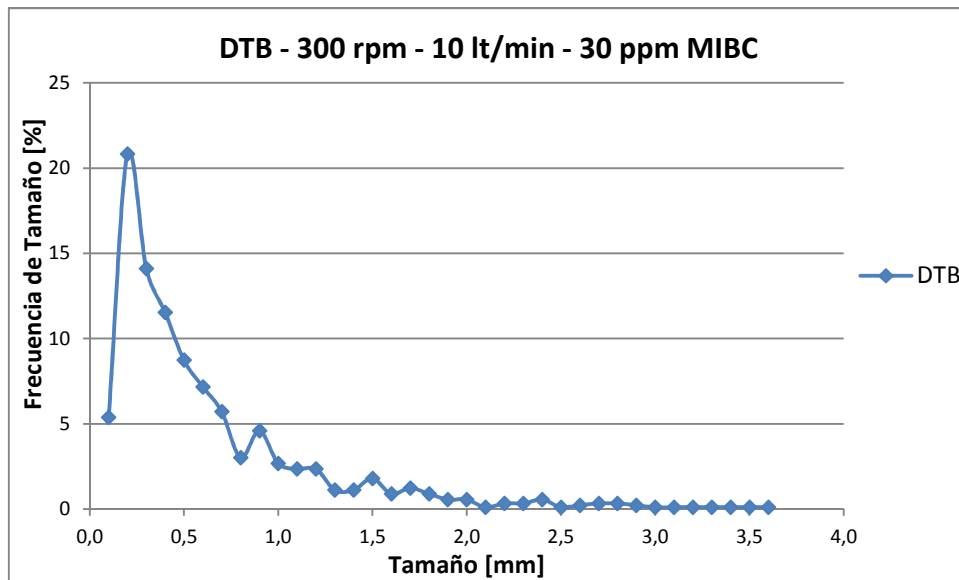


Figura 77. DTB para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

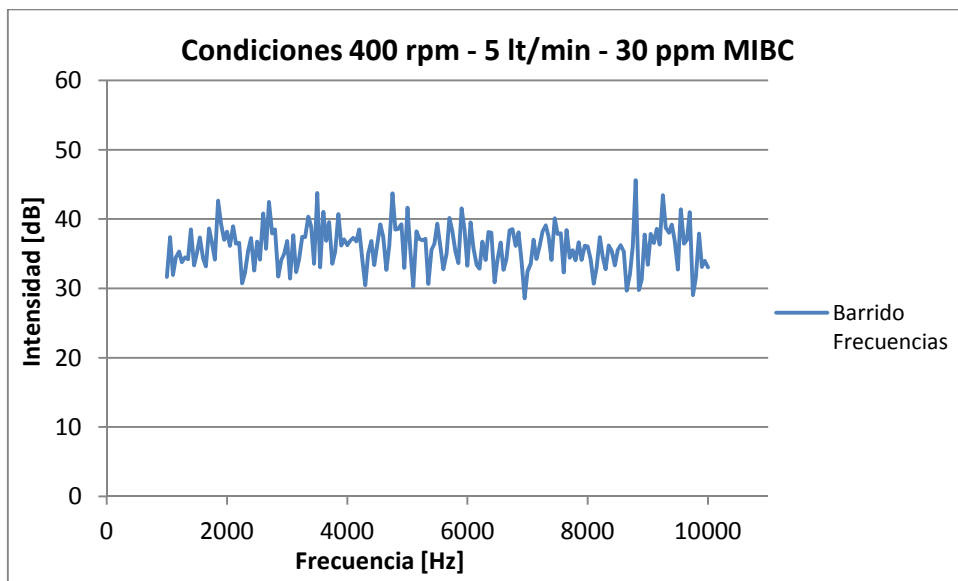


Figura 78. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

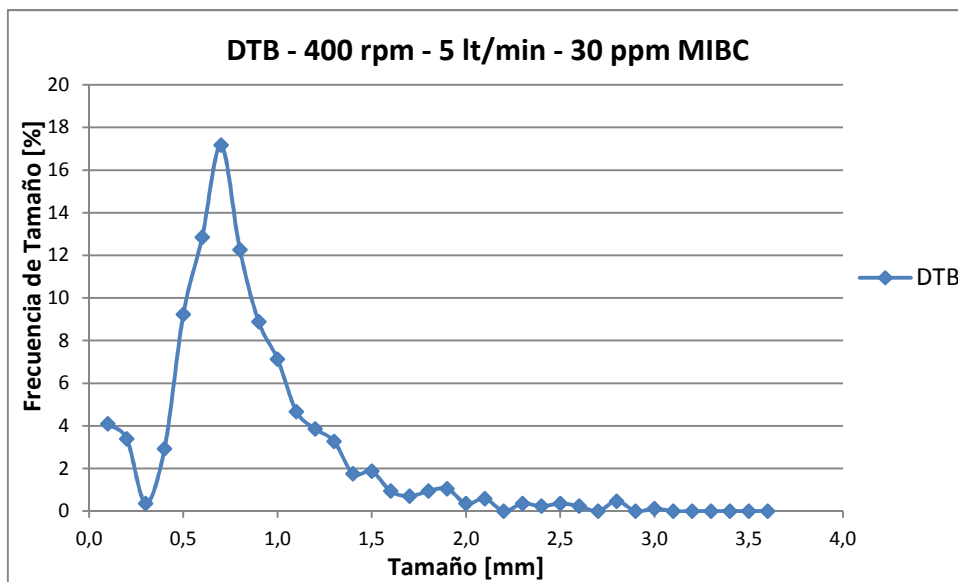


Figura 79. DTB para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

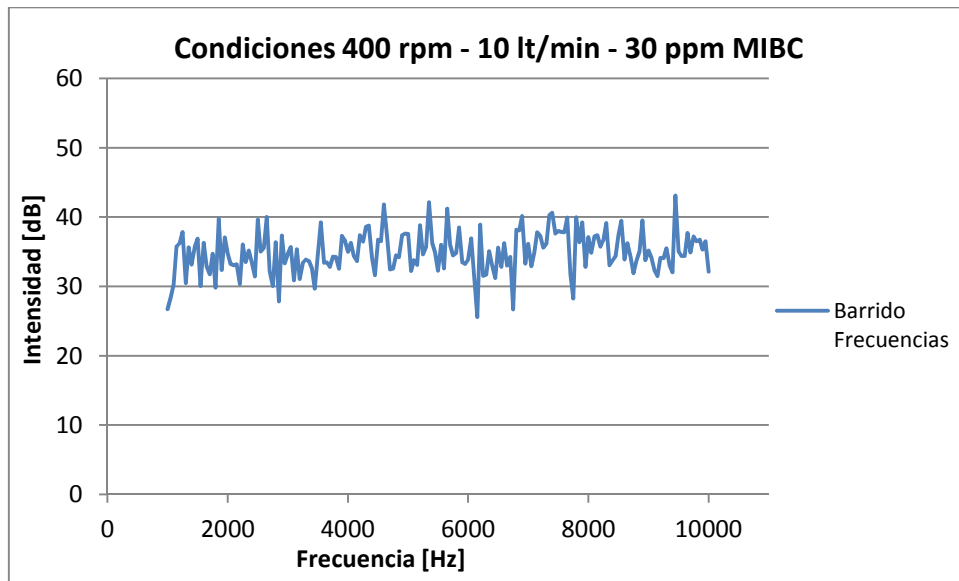


Figura 80. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

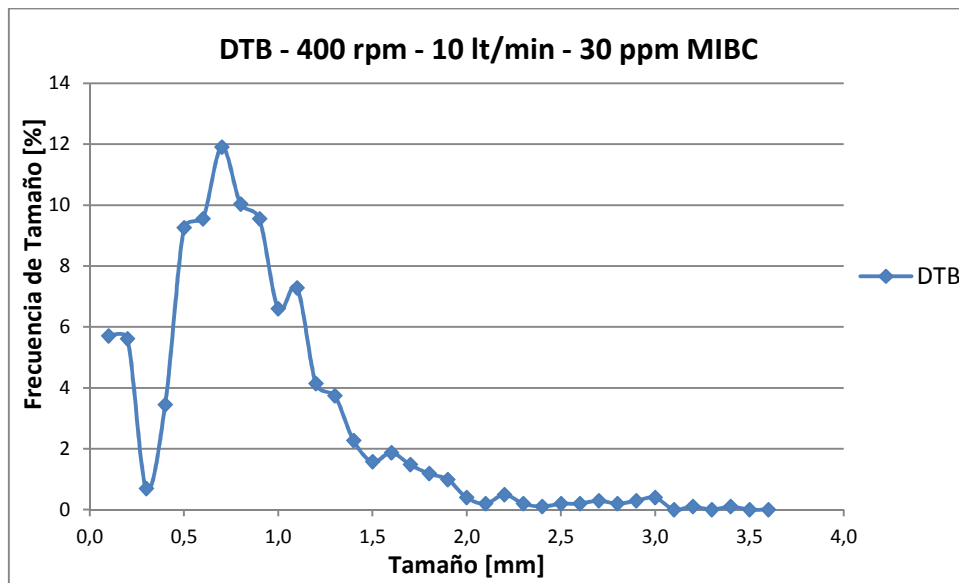


Figura 81. DTB para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

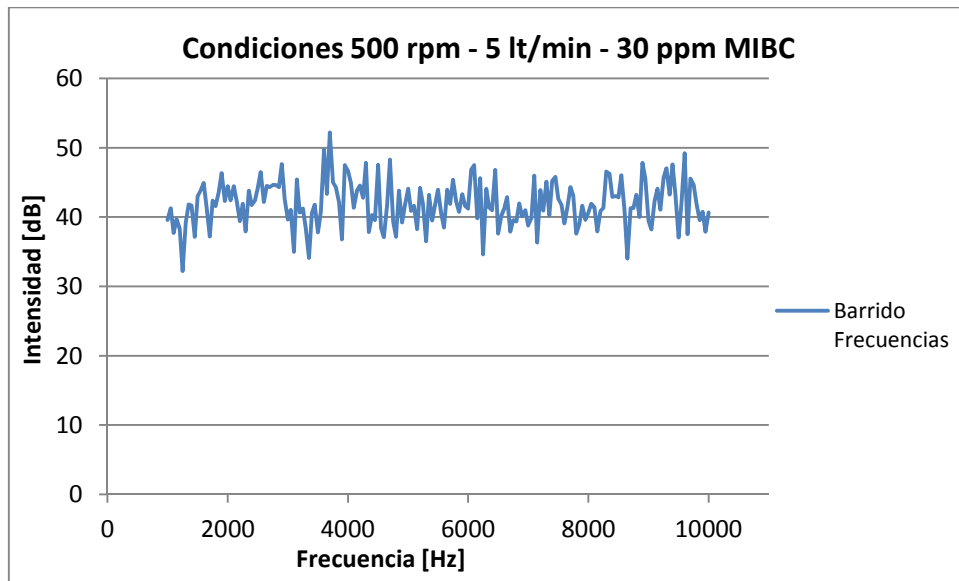


Figura 82. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

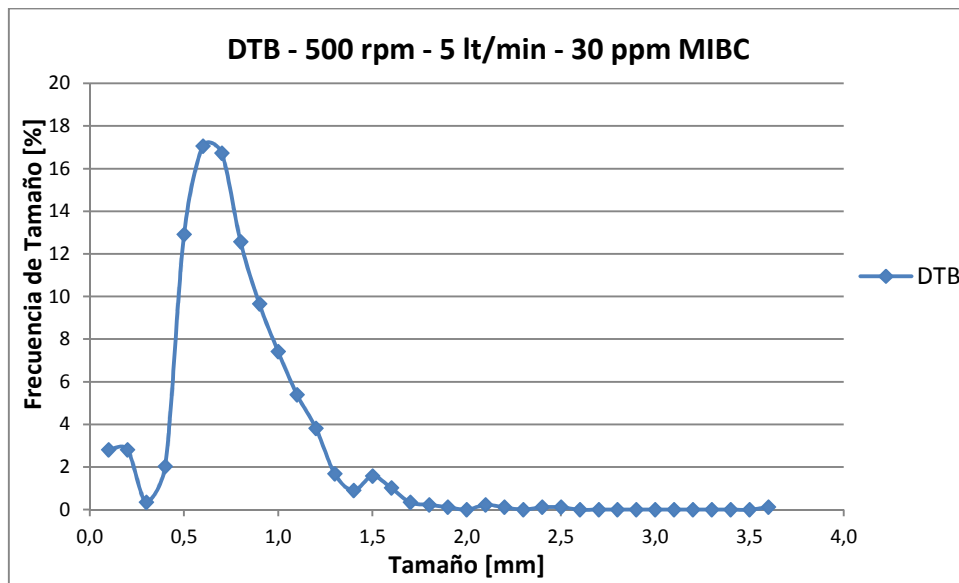


Figura 83. DTB para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

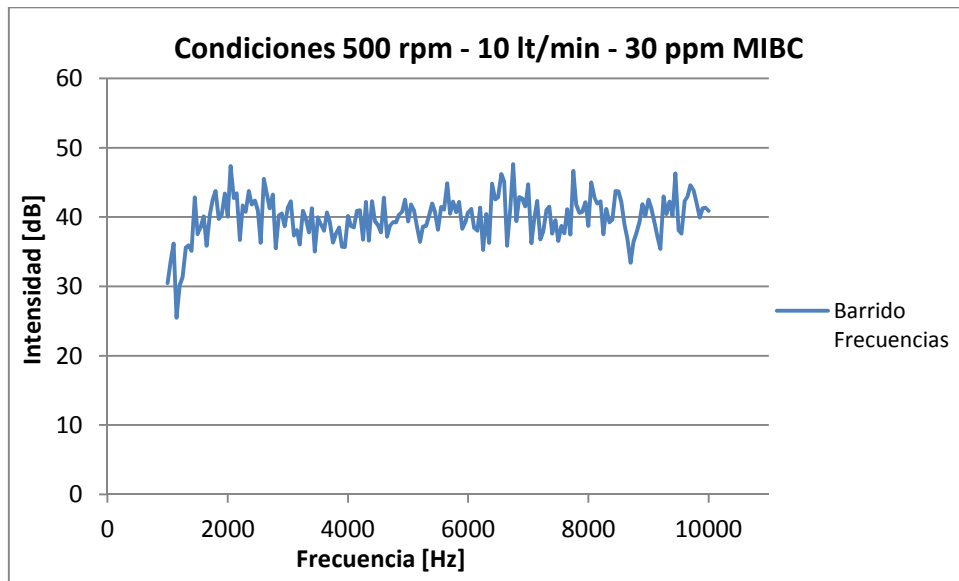


Figura 84. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

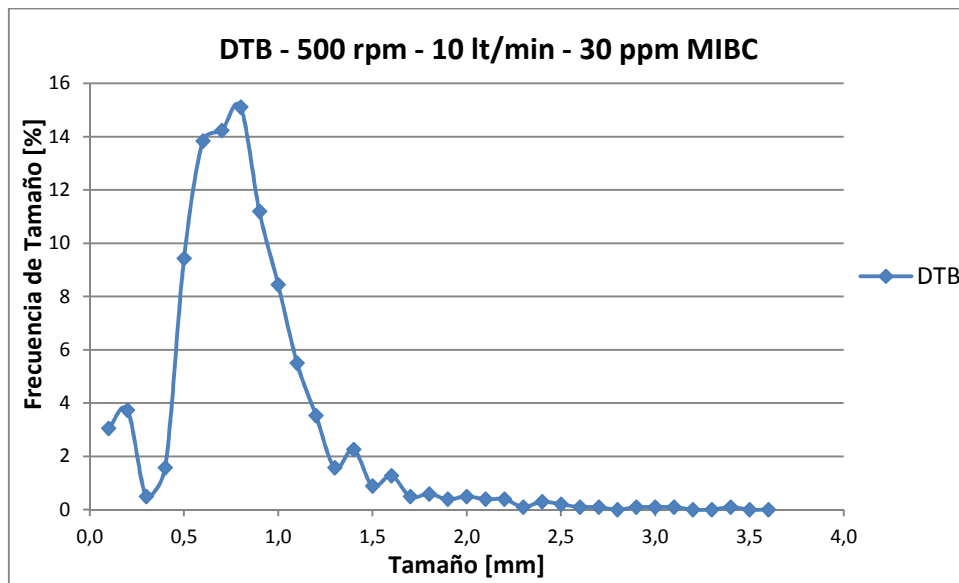


Figura 85. DTB para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

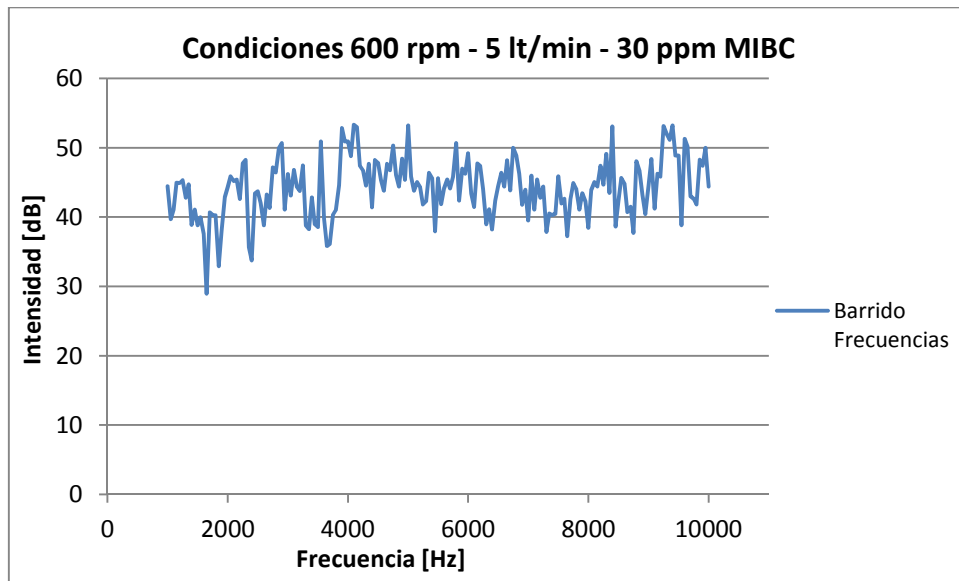


Figura 86. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

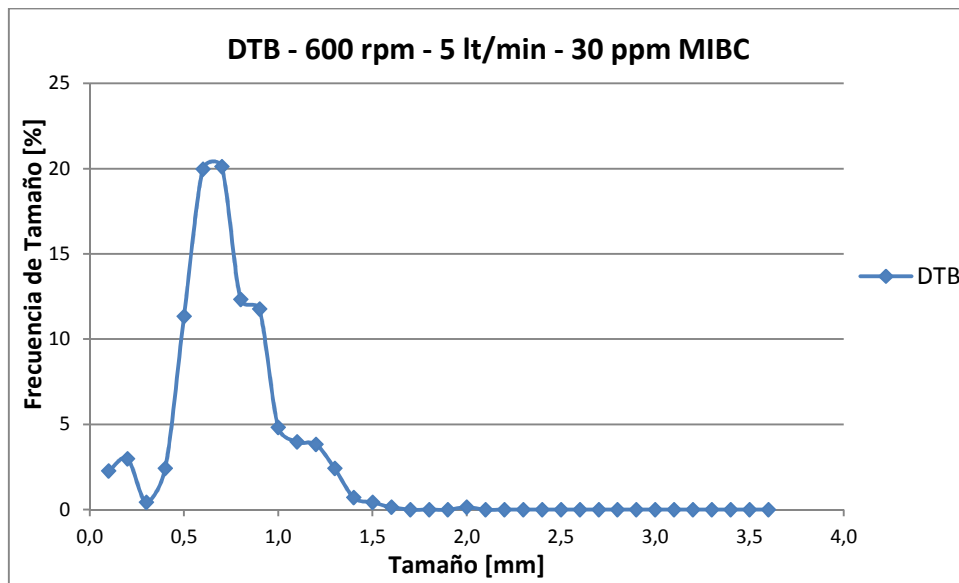


Figura 87. DTB para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

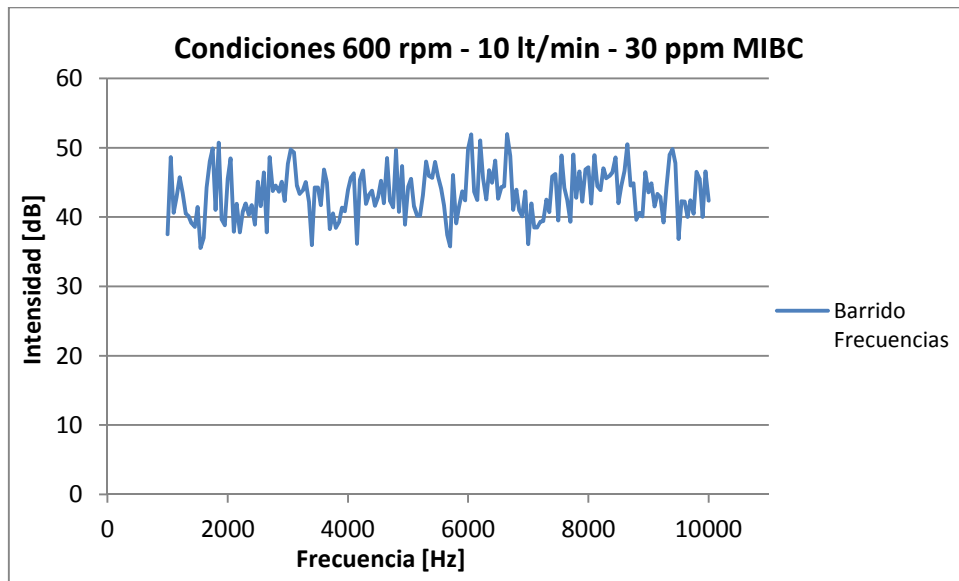


Figura 88. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

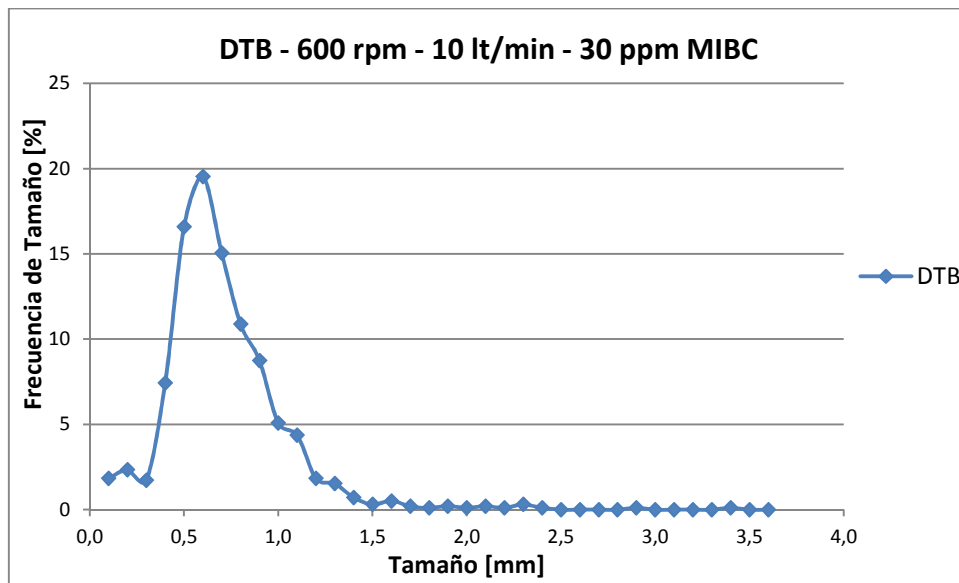


Figura 89. DTB para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M1).

C.3.2 Set de Mediciones 2

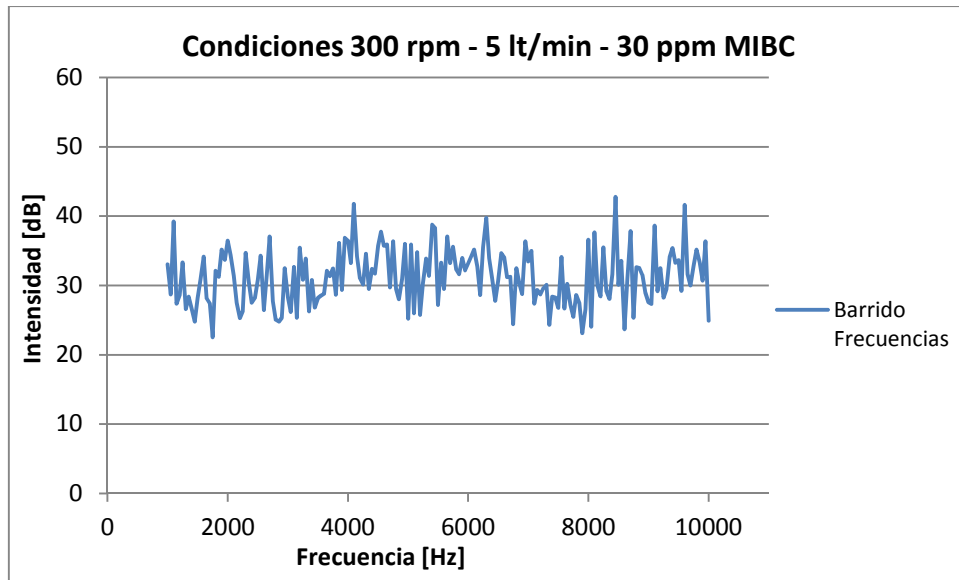


Figura 90. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

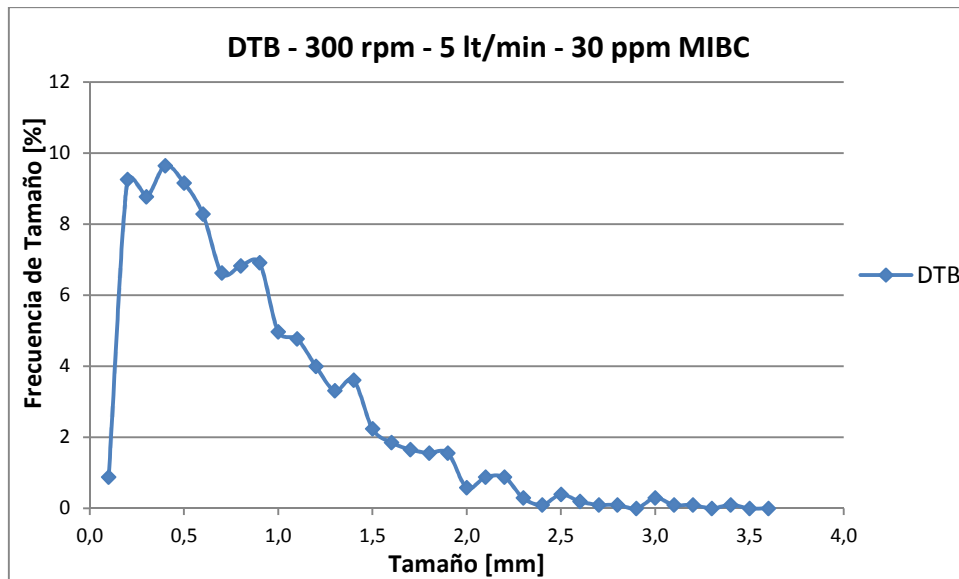


Figura 91. DTB para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

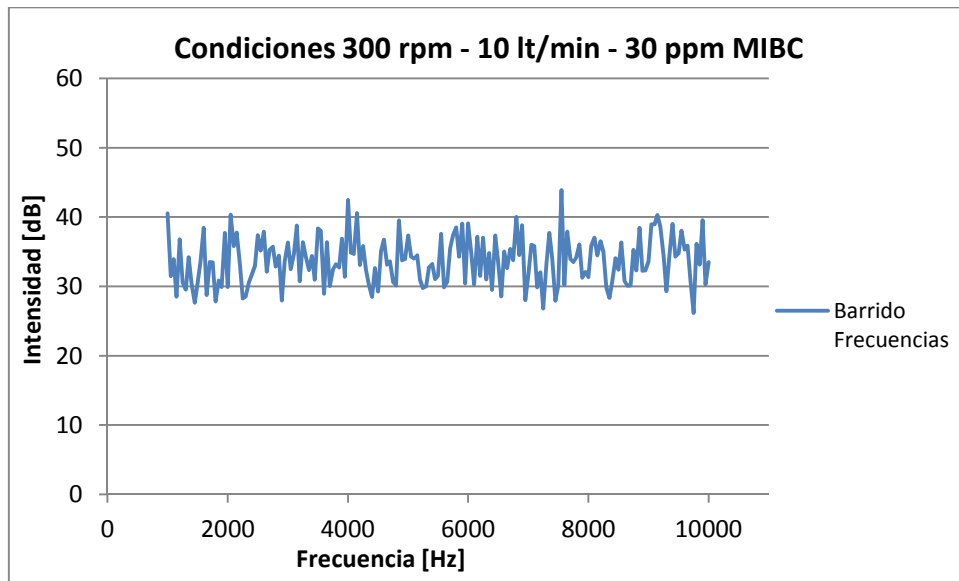


Figura 92. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

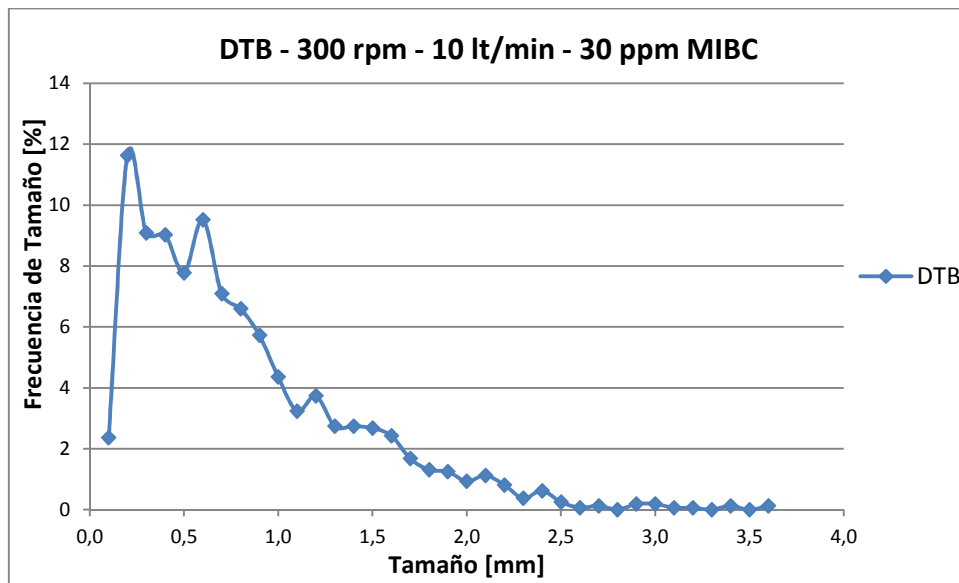


Figura 93. DTB para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

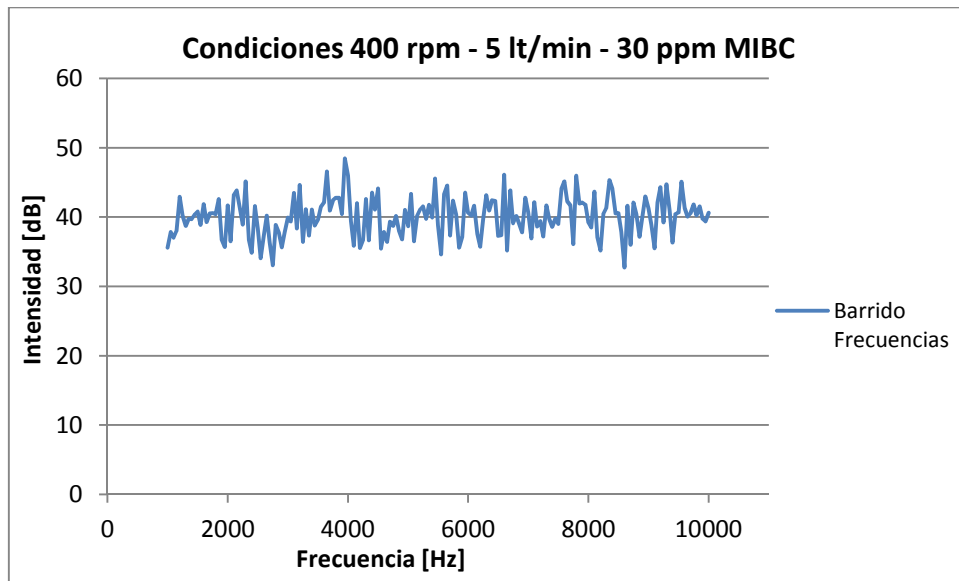


Figura 94. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

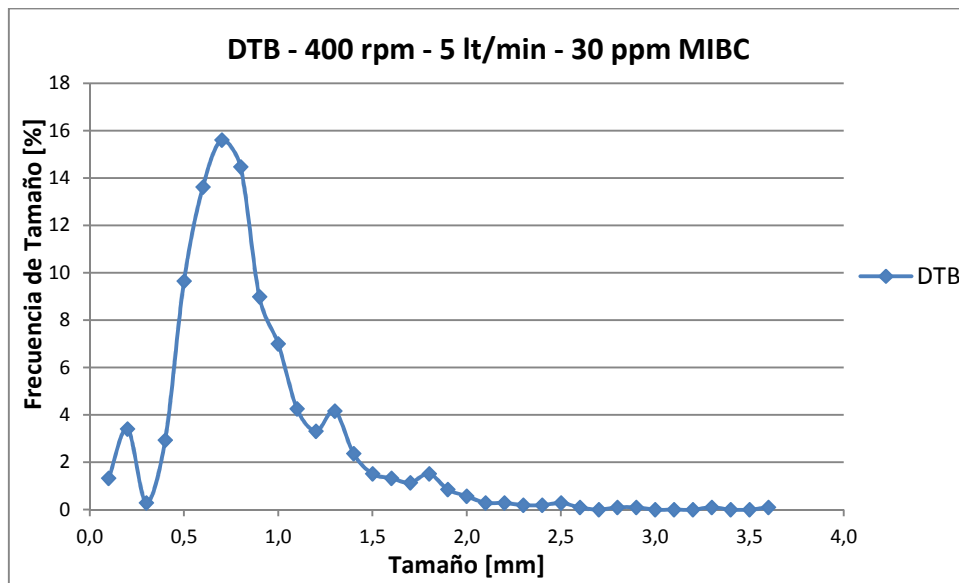


Figura 95. DTB para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

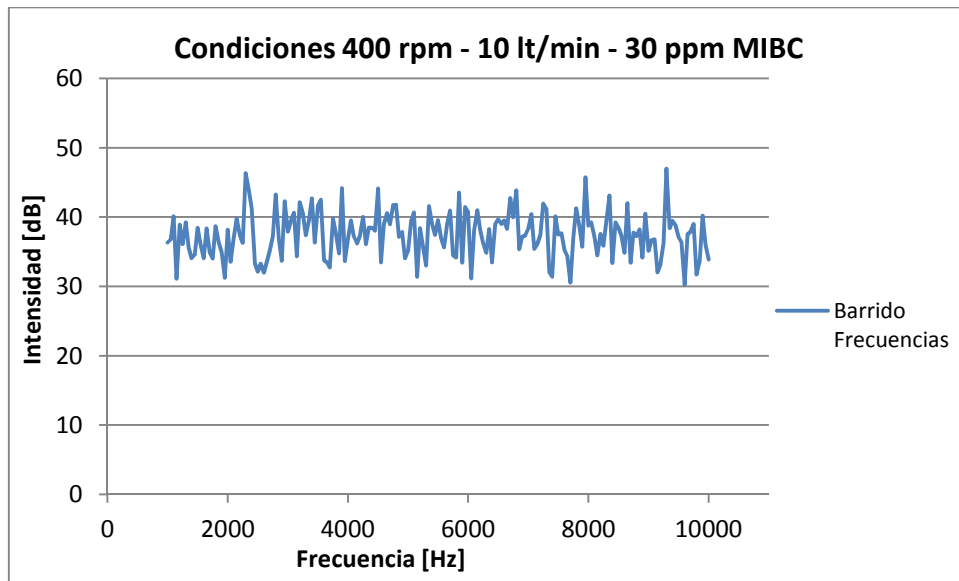


Figura 96. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

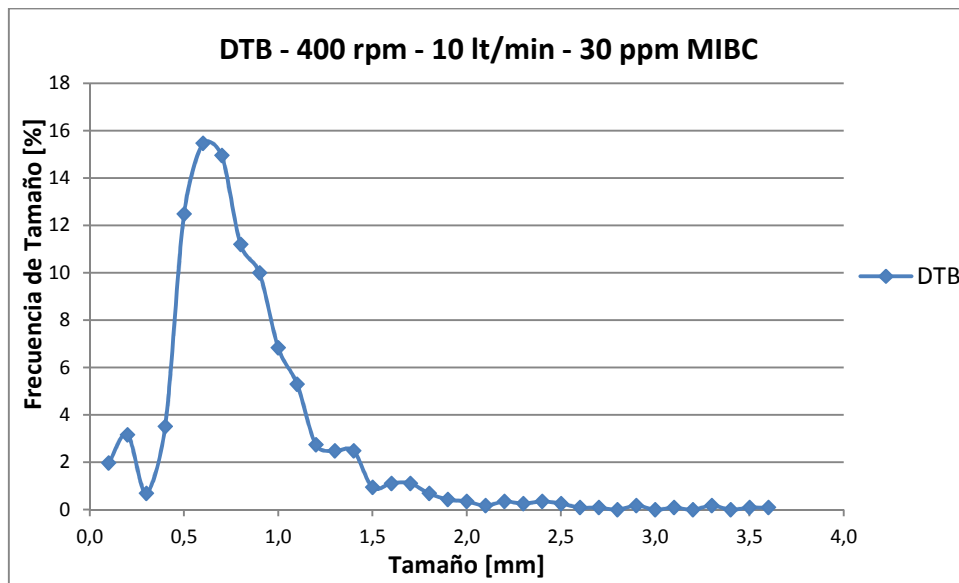


Figura 97. DTB para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

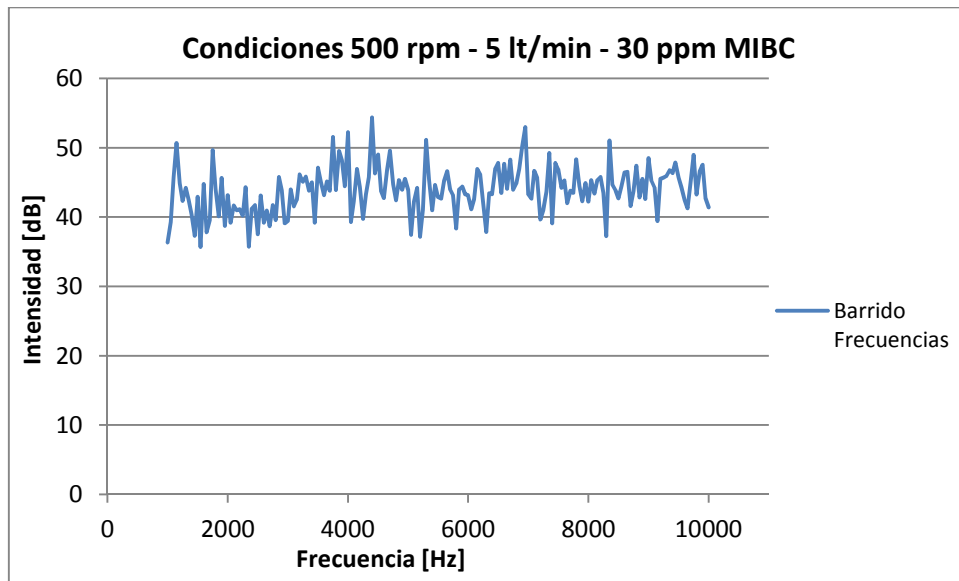


Figura 98. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

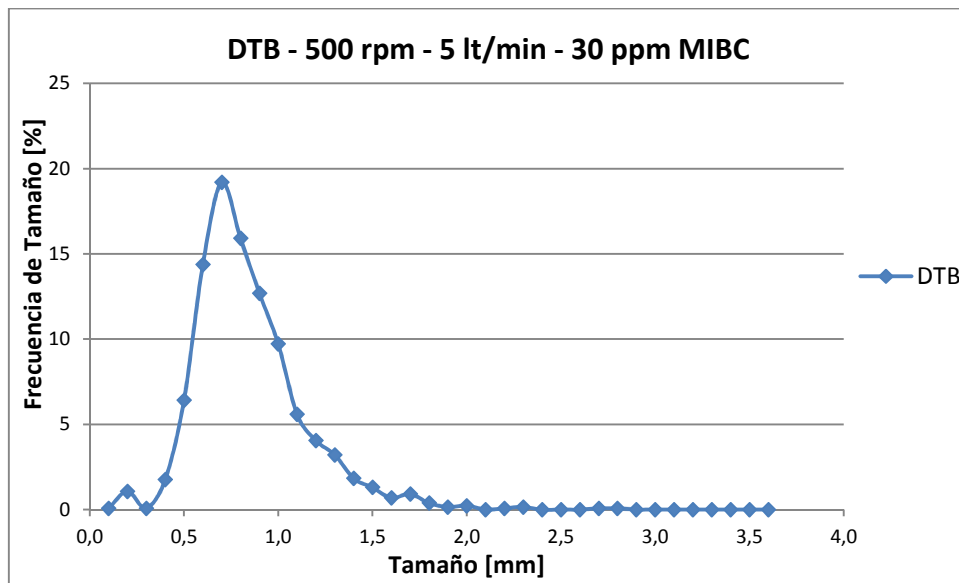


Figura 99. DTB para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

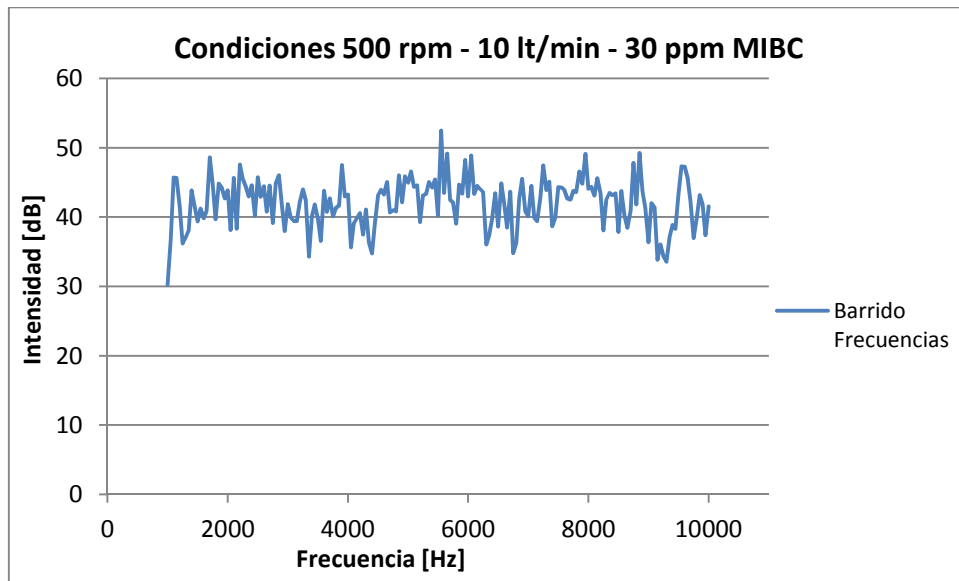


Figura 100. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

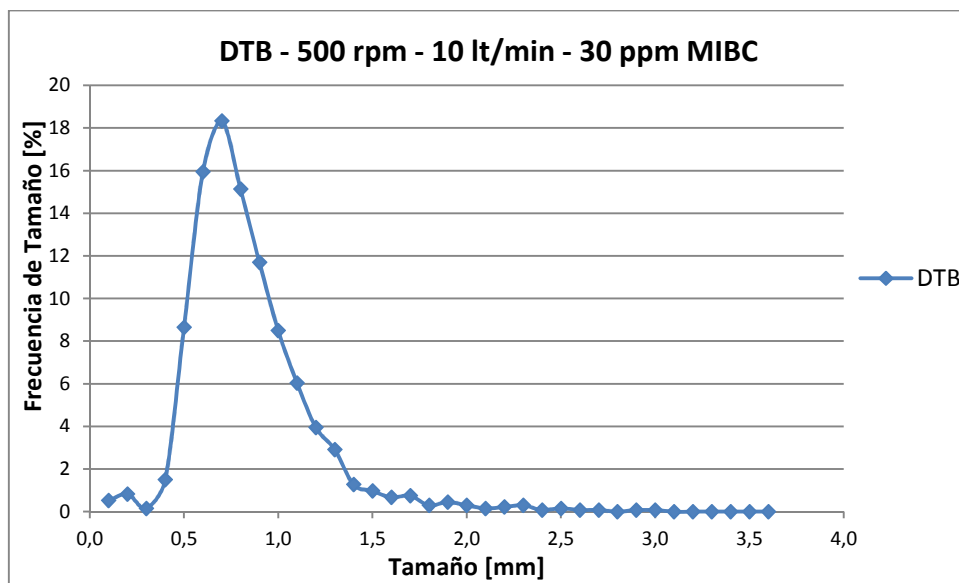


Figura 101. DTB para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

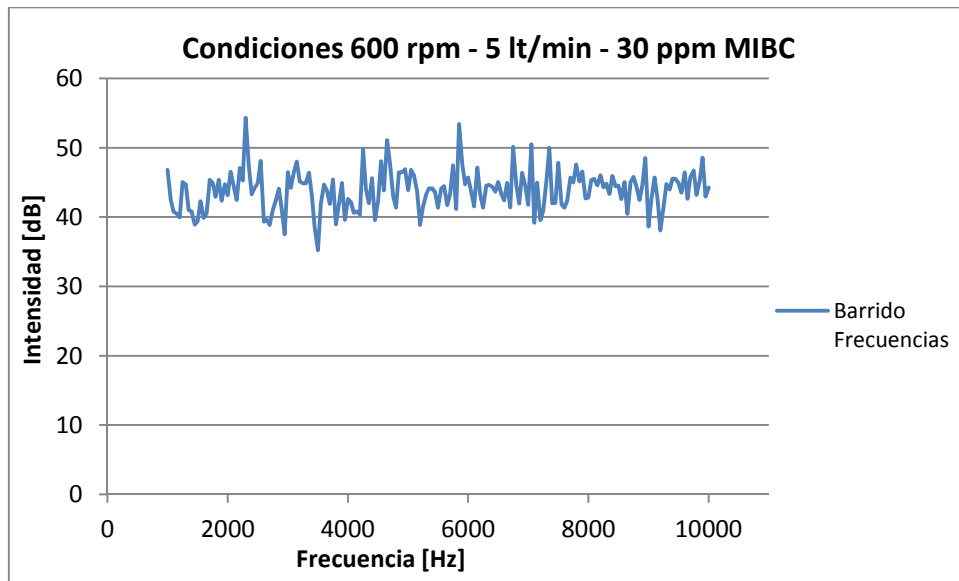


Figura 102. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

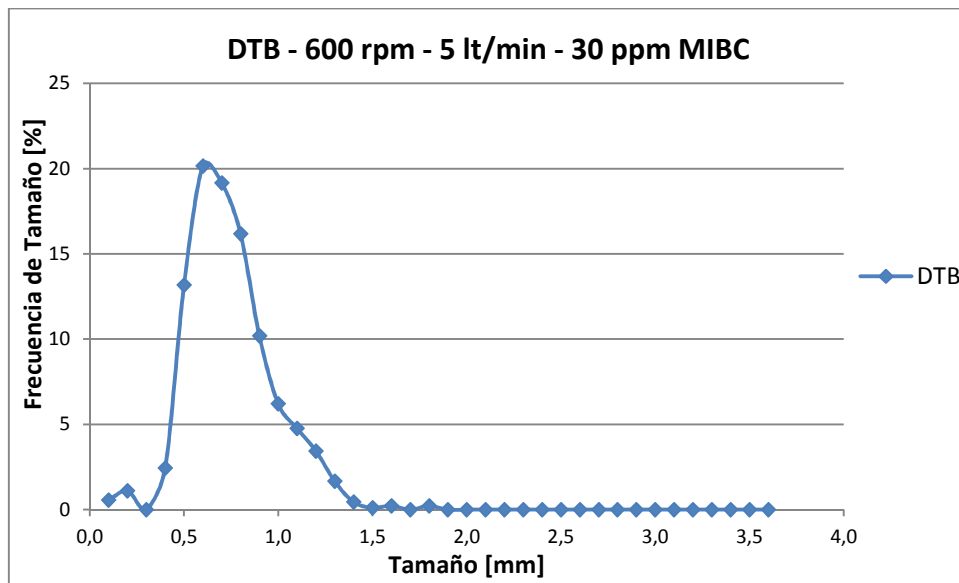


Figura 103. DTB para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

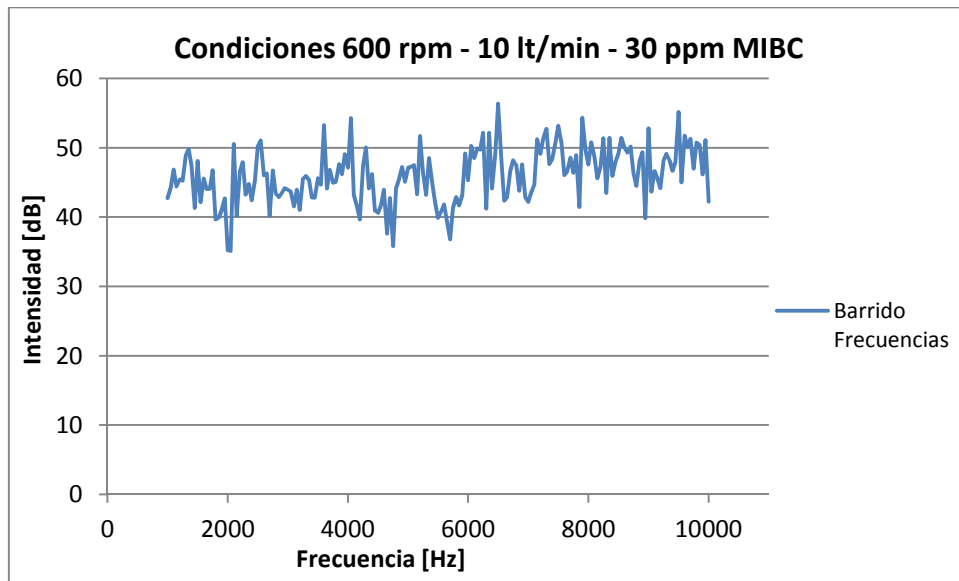


Figura 104. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

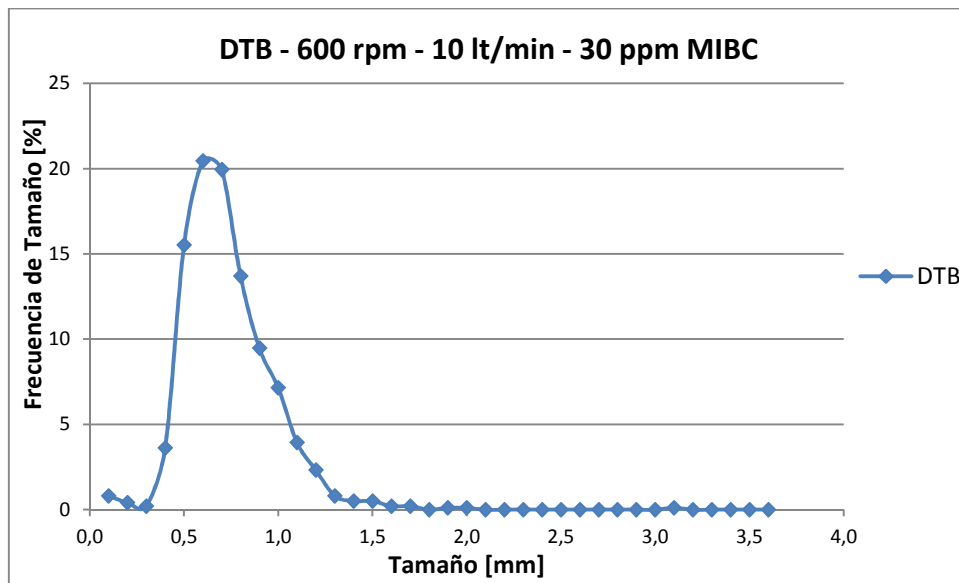


Figura 105. DTB para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M2).

C.3.3 Set de Mediciones 3

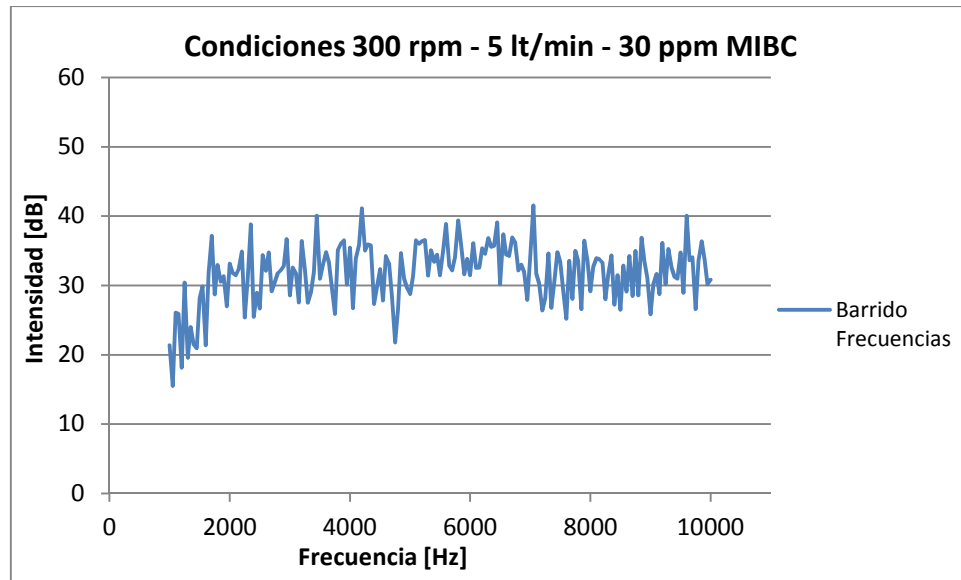


Figura 106. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

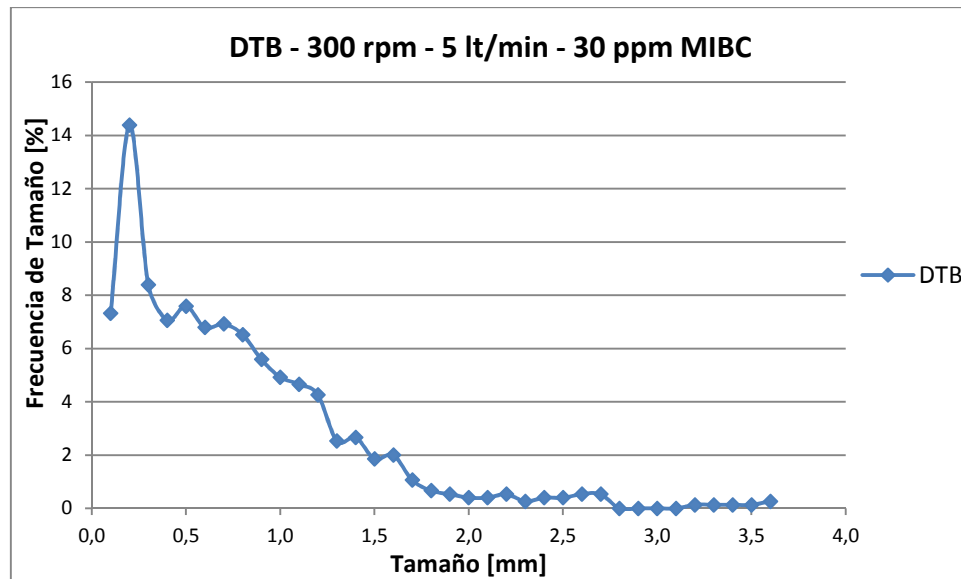


Figura 107. DTB para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

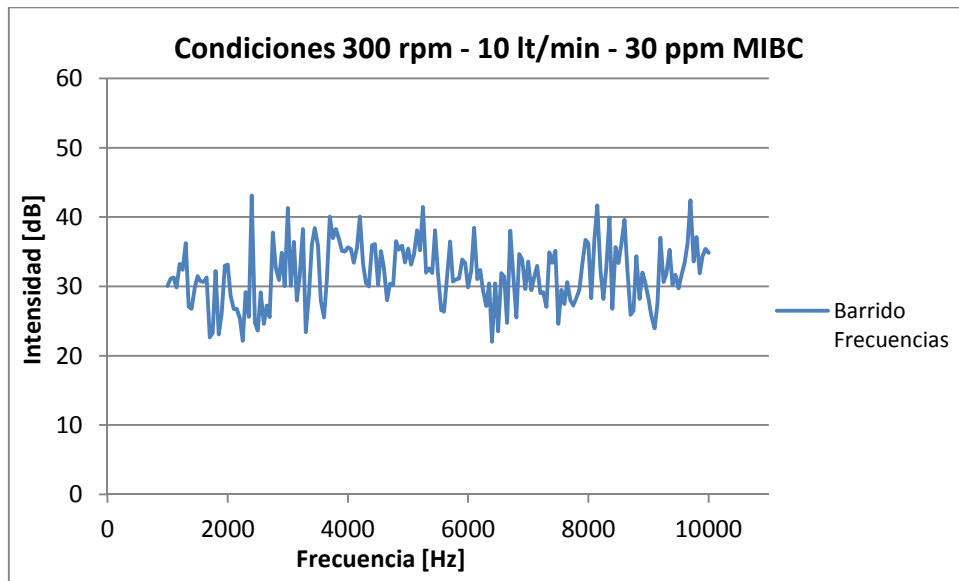


Figura 108. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

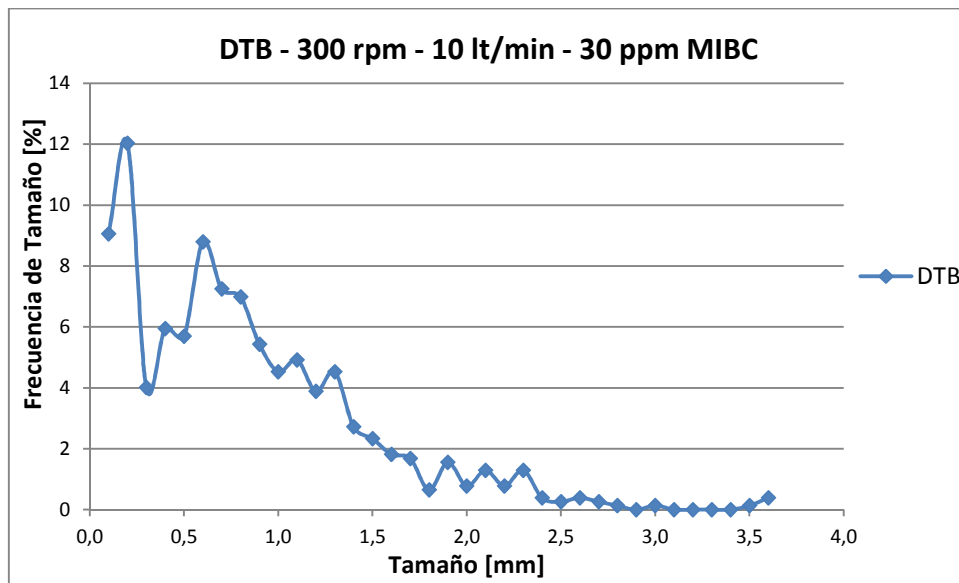


Figura 109. DTB para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

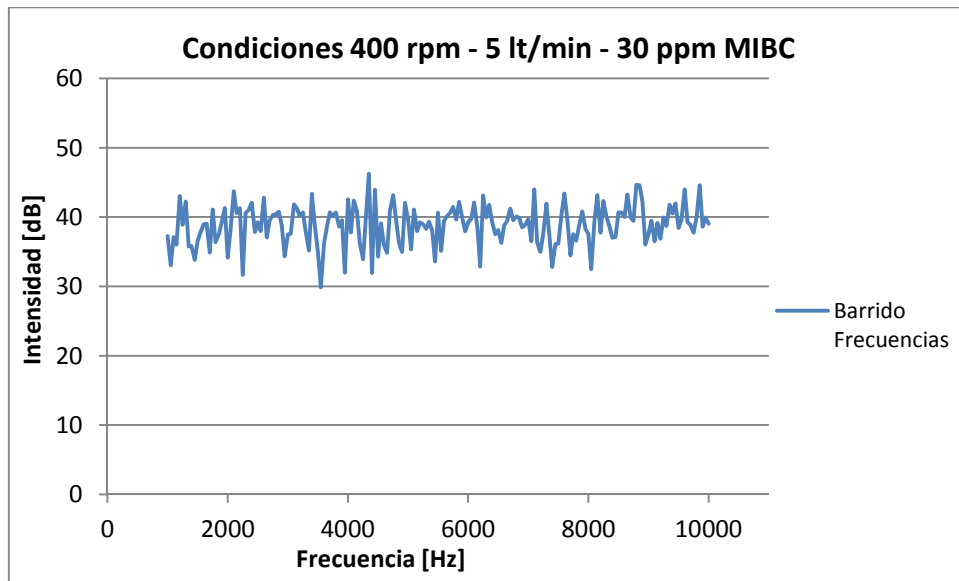


Figura 110. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

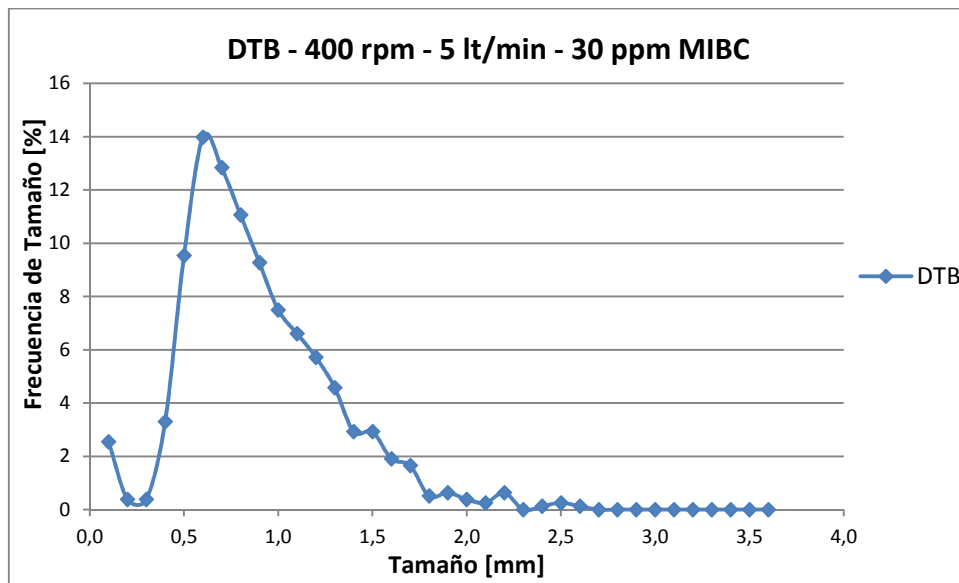


Figura 111. DTB para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

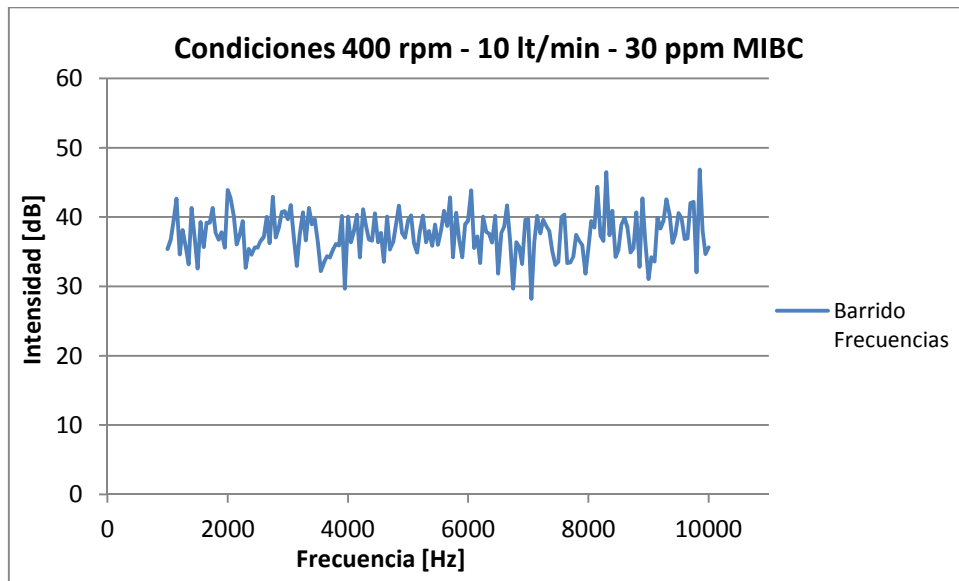


Figura 112. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

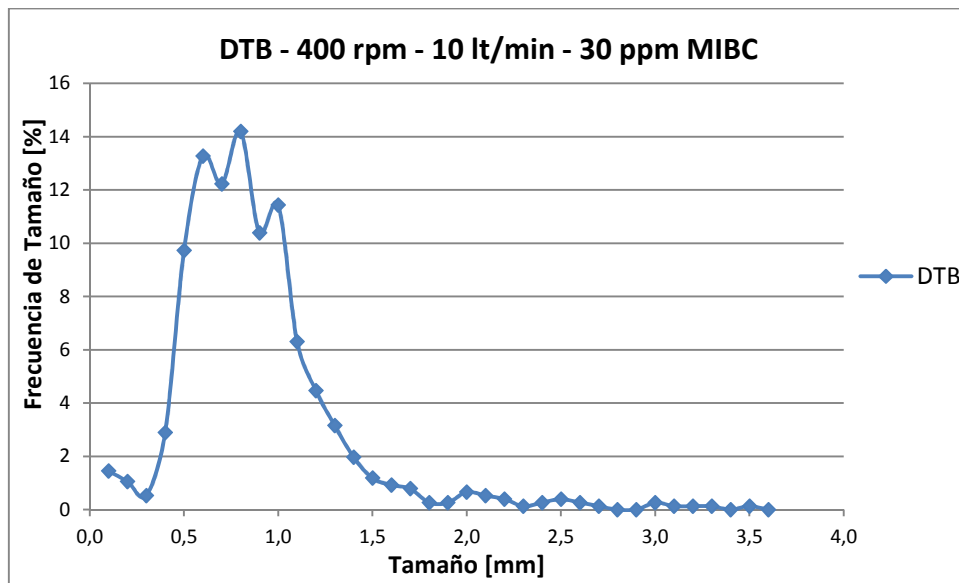


Figura 113. DTB para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

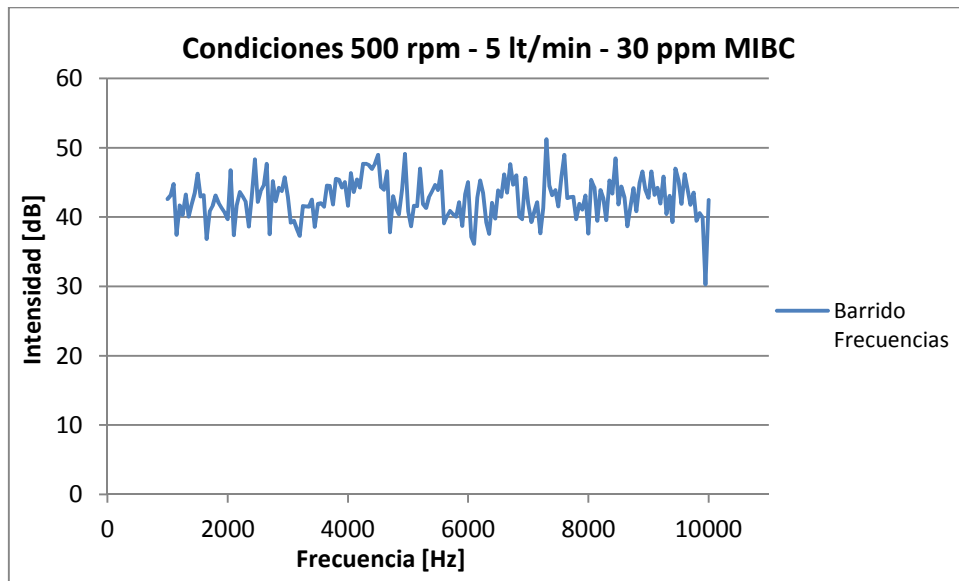


Figura 114. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

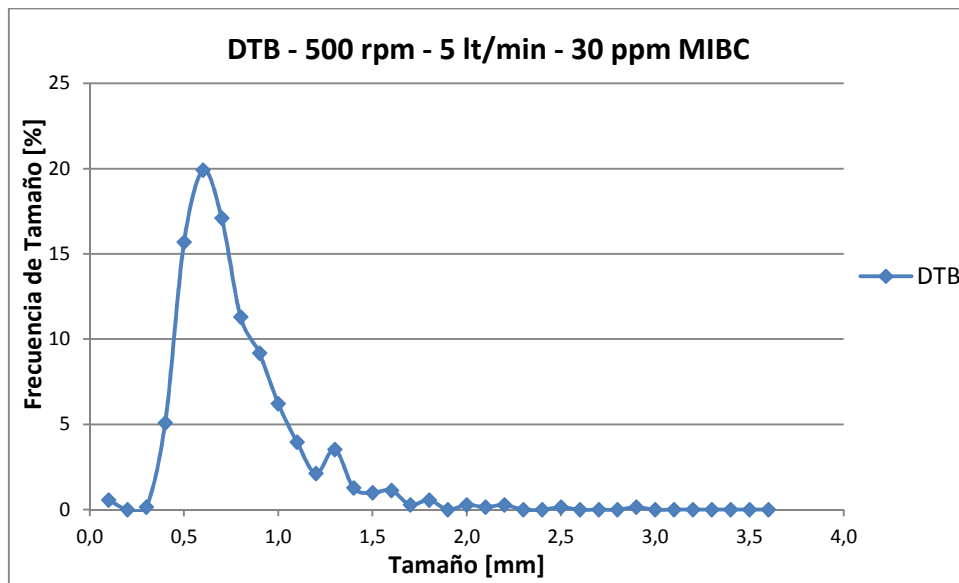


Figura 115. DTB para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

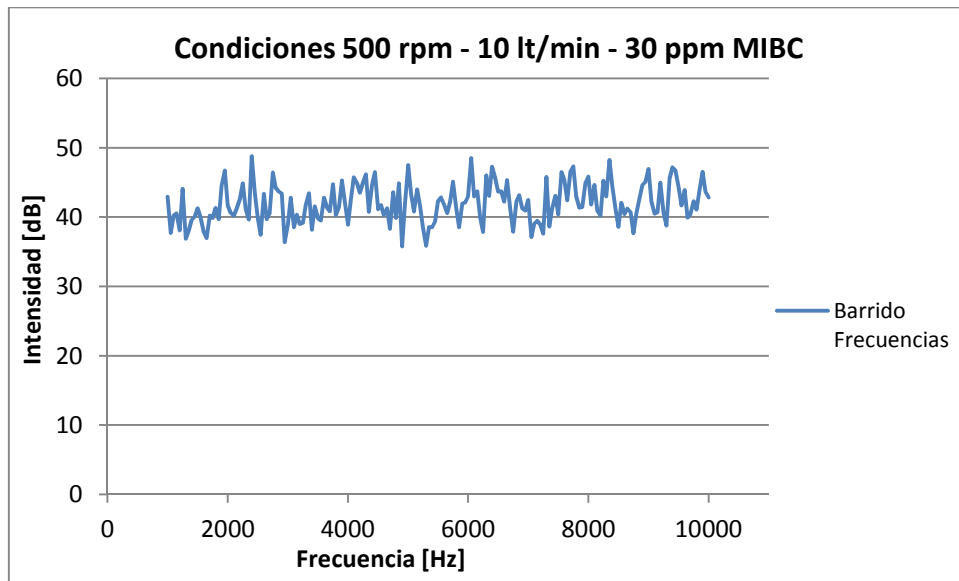


Figura 116. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

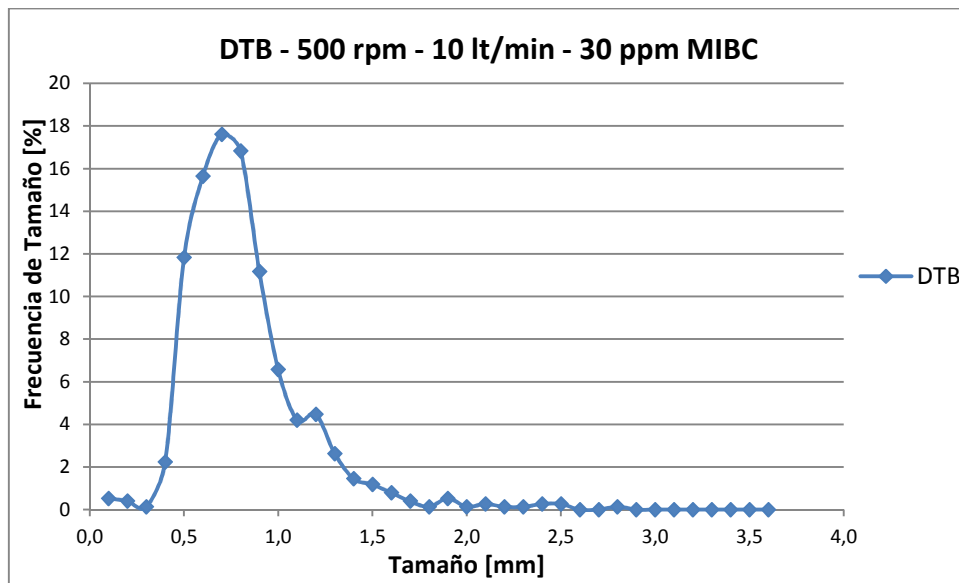


Figura 117. DTB para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

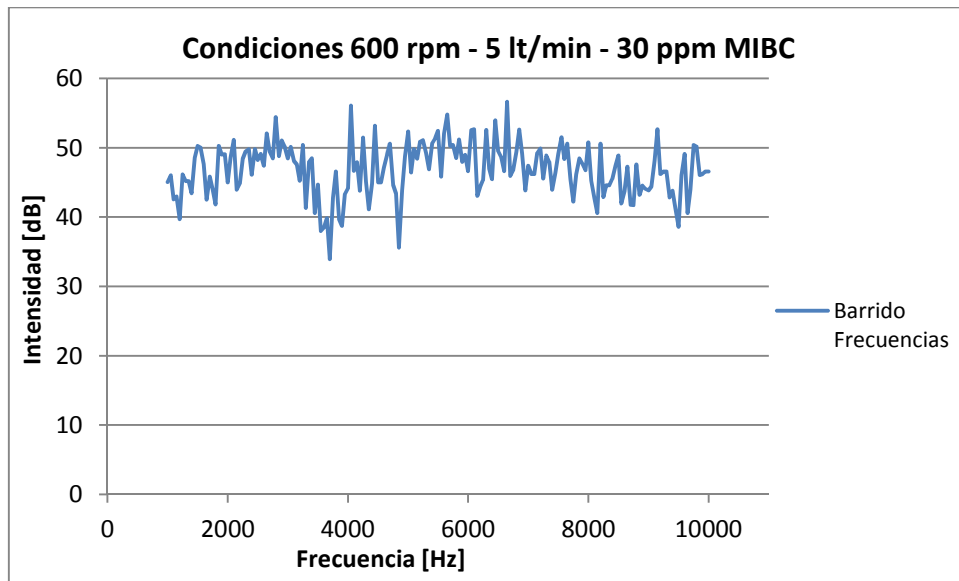


Figura 118. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

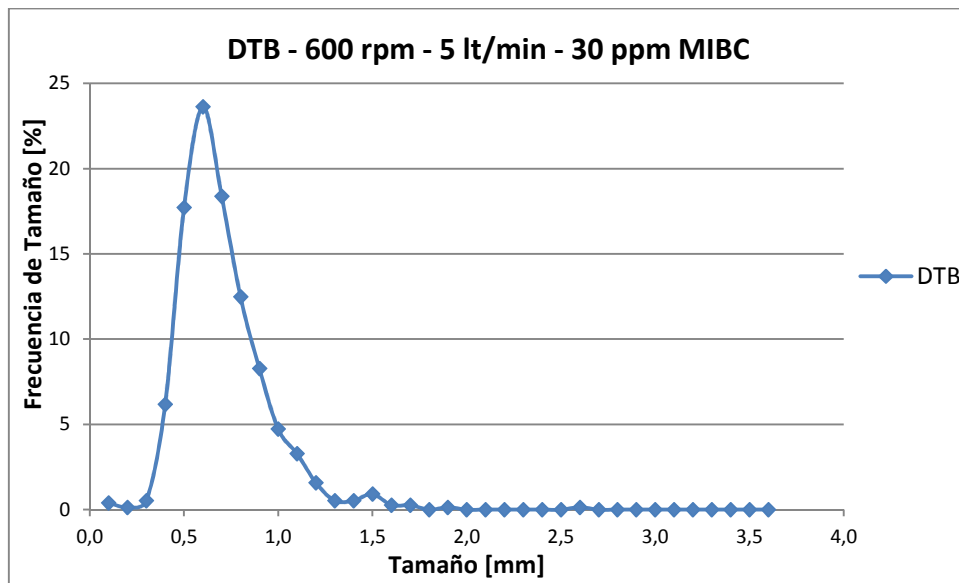


Figura 119. DTB para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

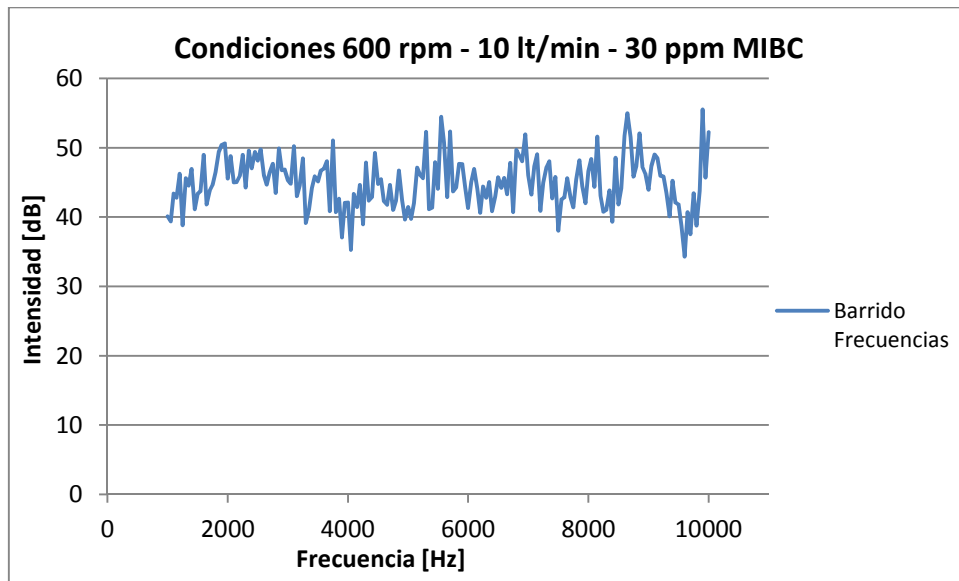


Figura 120. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

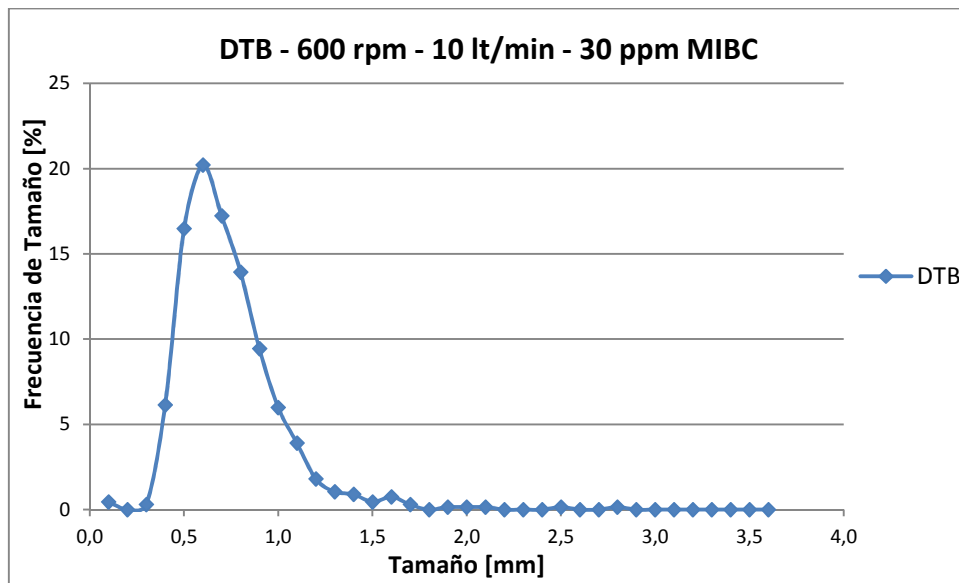


Figura 121. DTB para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (M3).

C.4 Pruebas Sistema Trifásico

Tabla 25. Resultados en sistema trifásico: intensidad acústica y d₃₂ medido por análisis de imágenes.

Velocidad de Agitación [rpm]	Flujo de Aire [lt/min]	Intensidad Acústica [dB]	d ₃₂ Análisis de Imágenes [mm]
300	5	38,02	1,66
	10	36,90	1,80
400	5	44,06	1,30
	10	43,27	1,42
500	5	48,75	1,08
	10	48,04	1,19
600	5	50,07	0,89
	10	50,22	0,99

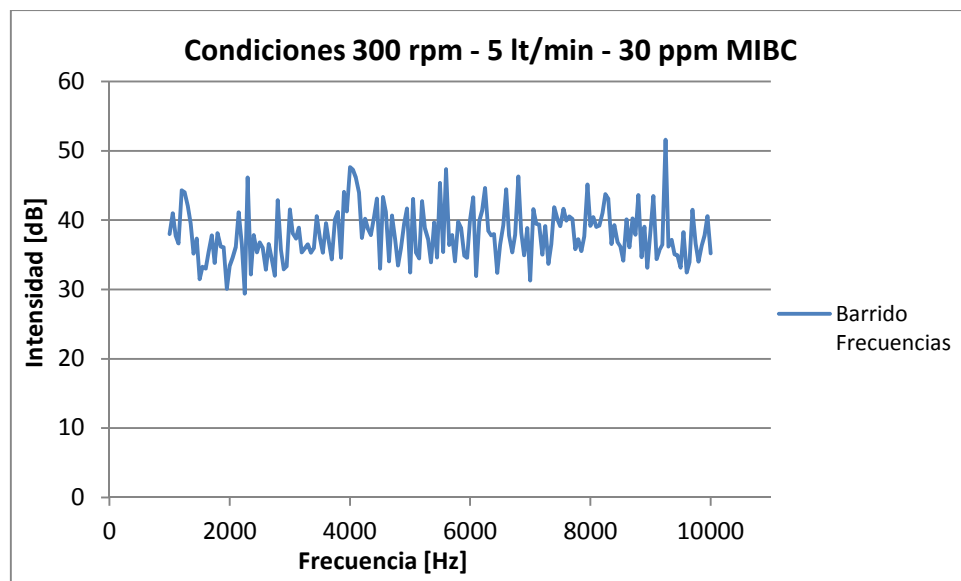


Figura 122. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).

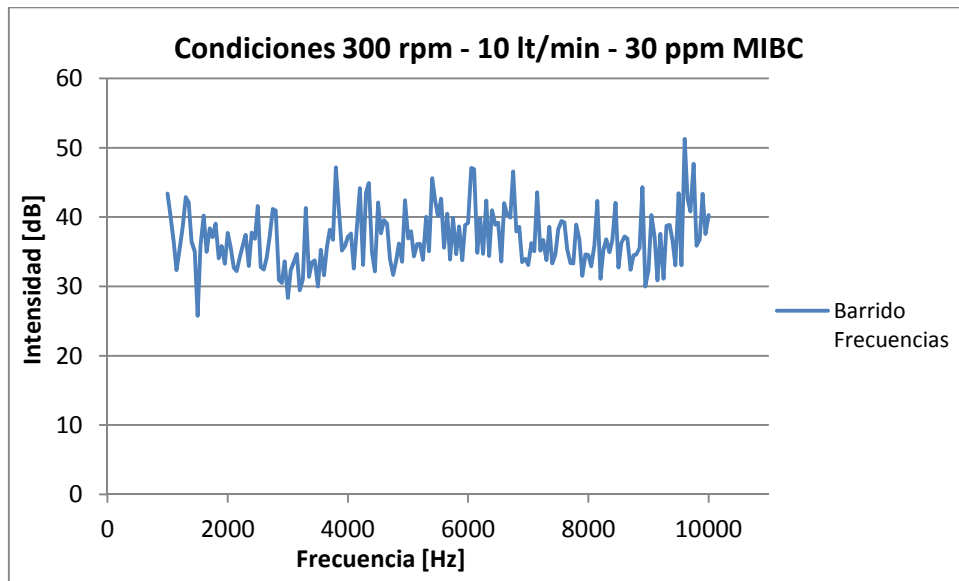


Figura 123. Barrido de frecuencias para condiciones 300 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).

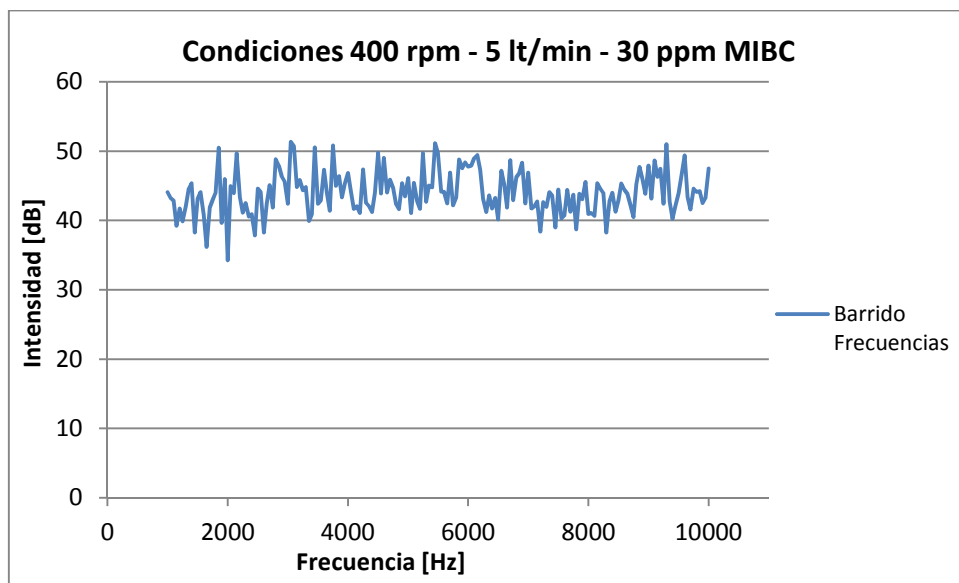


Figura 124. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).

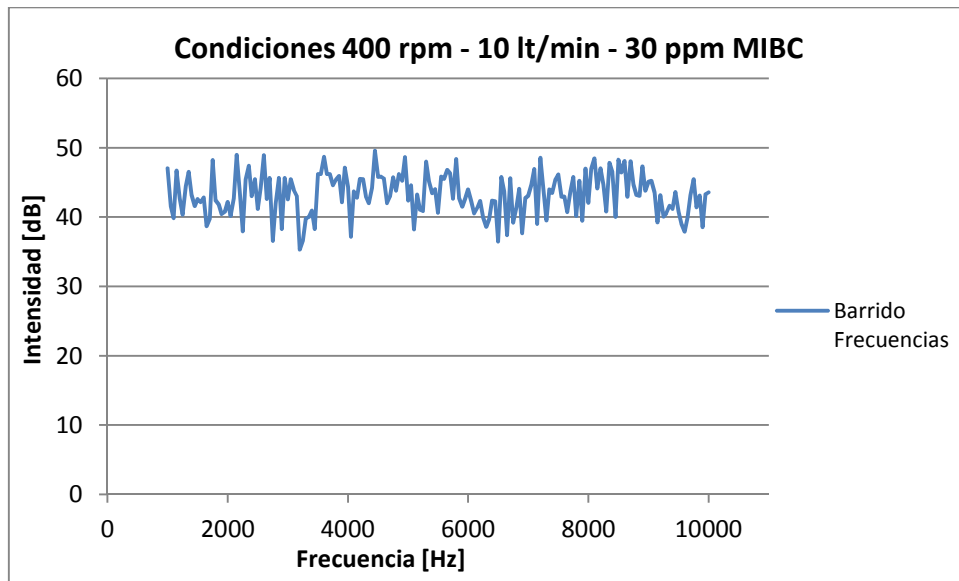


Figura 125. Barrido de frecuencias para condiciones 400 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).

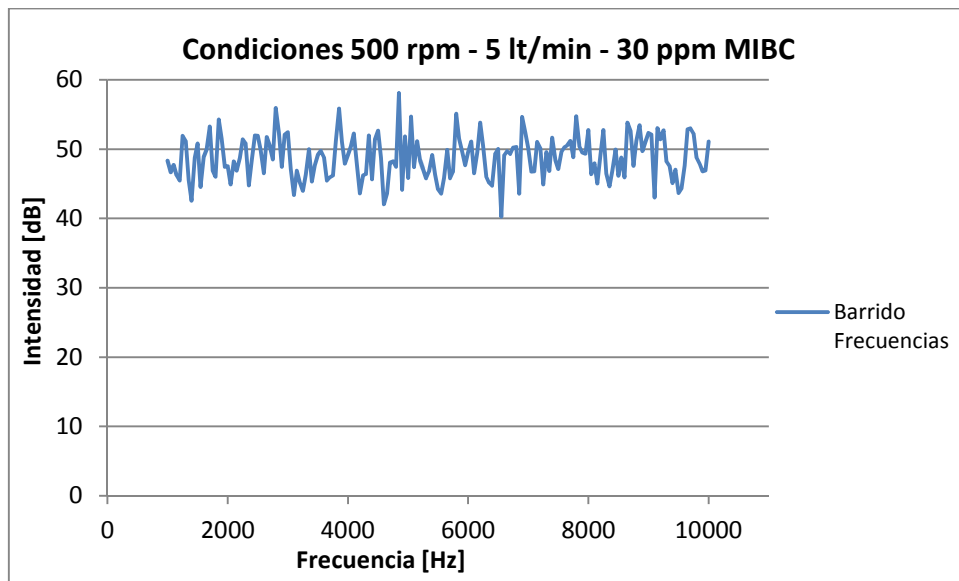


Figura 126. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).

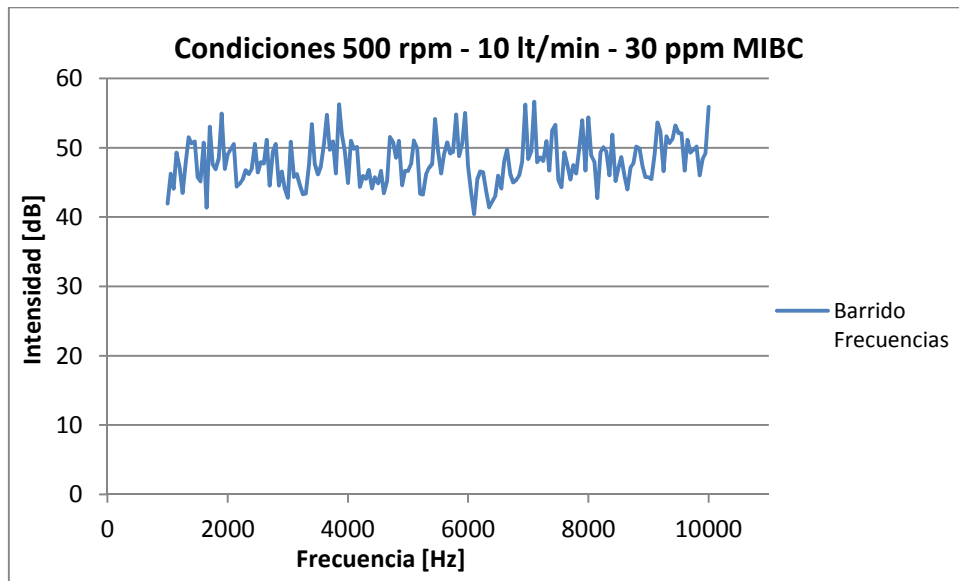


Figura 127. Barrido de frecuencias para condiciones 500 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).

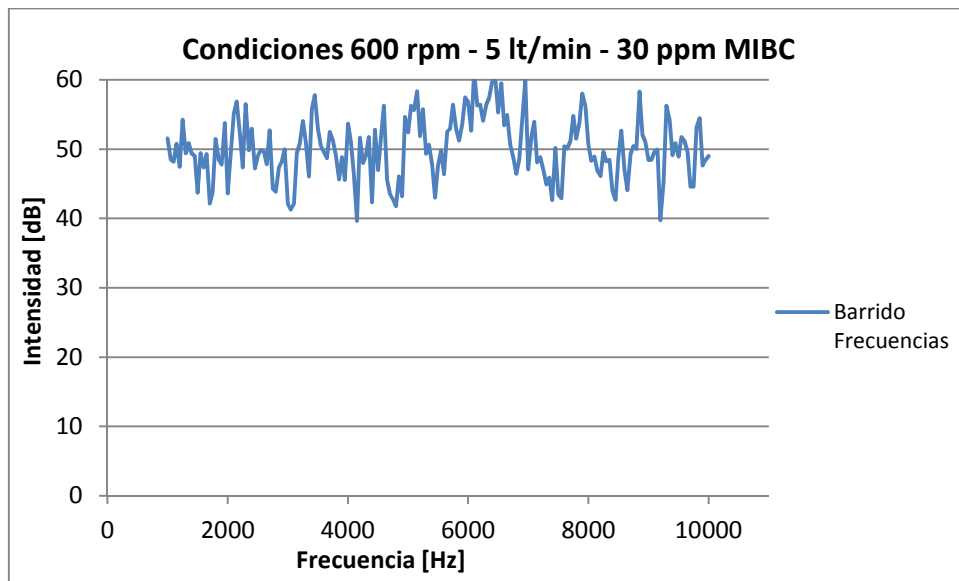


Figura 128. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 5 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).

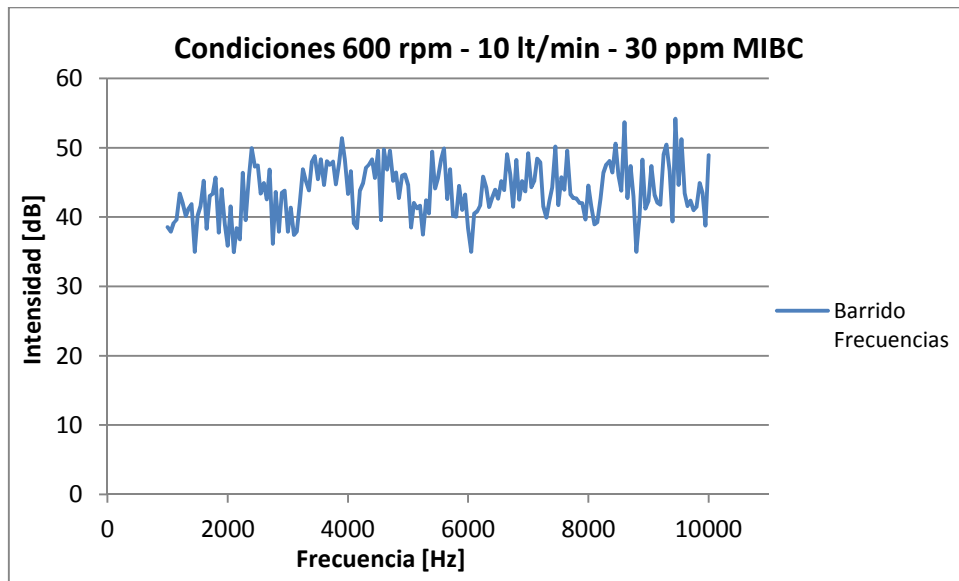


Figura 129. Barrido de frecuencias para condiciones 600 rpm, 10 lt/min, 30 ppm MIBC (trifásico).

ANEXOS D: Resultados Pruebas Curvas de Coalescencia

D.1 Resultados de Reproducibilidad

Se presentan los resultados de los tamaños d_{32} para las pruebas de reproducibilidad realizadas en un sistema en presencia de espumante MIBC.

Tabla 26. Resultados reproducibilidad. Diámetro de Sauter calculado por métodos acústicos.

Concentración [ppm MIBC]	Prueba 1 d_{32} Modelo [mm]	Prueba 2 d_{32} Modelo [mm]	Prueba 3 d_{32} Modelo [mm]
0	4,84	4,67	4,70
5	2,61	2,51	2,63
10	1,41	1,29	1,40
15	0,98	0,88	0,90
20	0,85	0,91	0,84
25	0,84	0,92	0,93
30	0,87	0,94	0,94

D.2 Resultados

D.2.1 Resultados Pruebas con MIBC

Se presentan los resultados de los tamaños d_{32} obtenidos mediante la medición acústica para el sistema con espumante MIBC.

Tabla 27. Tamaños d_{32} para pruebas realizadas con espumante MIBC.

Concentración [ppm MIBC]	Flujo de Aire 5 [lt/min]			
	300 [rpm]	400 [rpm]	500 [rpm]	600 [rpm]
0	4,75	4,35	3,96	4,58
5	2,24	2,25	2,21	2,31
10	1,65	1,24	1,17	1,18
15	1,10	0,93	0,97	1,09
20	0,92	0,88	1,00	1,12
25	0,99	0,85	0,96	1,06
30	0,99	0,87	0,90	1,10
Concentración [ppm MIBC]	Flujo de Aire 10 [lt/min]			
	300 [rpm]	400 [rpm]	500 [rpm]	600 [rpm]
0	5,15	4,84	4,34	4,57
5	2,62	2,61	2,57	2,50
10	1,99	1,41	1,15	1,20

15	1,60	0,98	0,92	1,08
20	1,49	0,85	0,93	1,09
25	1,44	0,84	0,94	1,09
30	1,46	0,87	1,03	1,12
	Flujo de Aire 15 [lt/min]			
Concentración	300	400	500	600
[ppm MIBC]	[rpm]	[rpm]	[rpm]	[rpm]
0	5,87	5,18	4,62	5,12
5	2,76	2,76	2,75	2,79
10	2,04	1,60	1,23	1,25
15	1,85	1,01	0,93	1,04
20	1,77	1,02	0,96	1,10
25	1,68	0,97	1,00	1,09
30	1,68	0,94	1,03	1,12

D.2.2 Resultados Pruebas con NaCl

Se presentan los resultados de los tamaños d_{32} obtenidos mediante la medición acústica para el sistema con NaCl.

Tabla 28. Tamaños d_{32} para pruebas realizadas con NaCl.

	Flujo de Aire 5 [lt/min]			
Concentración	300	400	500	600
[M]	[rpm]	[rpm]	[rpm]	[rpm]
0	4,85	4,20	3,90	4,54
0,1	2,46	2,65	2,78	2,76
0,2	1,14	0,91	0,86	0,95
0,3	1,08	0,69	0,72	0,95
0,4	0,95	0,72	0,69	0,88
0,5	0,99	0,84	0,85	1,04
0,6	0,90	0,82	0,84	1,05
	Flujo de Aire 10 [lt/min]			
Concentración	300	400	500	600
[M]	[rpm]	[rpm]	[rpm]	[rpm]
0	5,62	4,68	4,45	4,69
0,1	2,68	2,71	2,89	2,84
0,2	1,62	0,89	0,95	1,01
0,3	1,23	0,74	0,79	0,89
0,4	1,28	0,76	0,74	0,94
0,5	1,49	0,83	0,81	0,96
0,6	1,55	0,83	0,83	1,03
	Flujo de Aire 15 [lt/min]			
Concentración	300	400	500	600

[M]	[rpm]	[rpm]	[rpm]	[rpm]
0	6,17	5,14	4,66	5,26
0,1	2,79	2,74	2,94	2,87
0,2	2,01	1,06	1,05	1,04
0,3	1,81	0,91	0,84	0,91
0,4	1,70	0,91	0,85	1,01
0,5	1,61	0,95	0,79	0,92
0,6	1,62	1,08	0,87	1,00

D.3 Ajuste de Curvas de Coalescencia

A continuación se presentan los parámetros del modelo de ajuste de Nasset para las curvas de coalescencia. Los valores de estos parámetros se obtuvieron mediante un ajuste realizado mediante la herramienta Solver de Excel.

D.3.1 Ajuste MIBC

Tabla 29. Parámetros del modelo de Nasset para pruebas con espumante MIBC: diámetro límite (DI), A, B.

		Parámetros Modelo Nasset		
		DI	A	B
300	5	0,99	3,76	0,21
	10	1,45	3,70	0,22
	15	1,68	4,19	0,26
400	5	0,86	3,49	0,20
	10	0,87	3,97	0,19
	15	0,94	4,24	0,18
500	5	0,98	3,36	0,20
	10	0,98	3,36	0,20
	15	1,02	3,60	0,20
600	5	1,08	3,50	0,24
	10	1,10	3,47	0,22
	15	1,10	4,02	0,21

D.3.2 Ajuste NaCl

Tabla 30. Parámetros del modelo de Nessel para pruebas con NaCl: diámetro límite (DI), A, B.

		Parámetros Modelo Nessel		
		DI	A	B
300	5	0,94	3,91	10,78
	10	1,52	4,10	14,01
	15	1,61	4,56	13,04
400	5	0,83	3,37	9,55
	10	0,83	3,85	10,08
	15	0,81	4,33	9,78
500	5	0,85	3,05	8,83
	10	0,82	3,63	8,93
	15	0,83	3,83	8,82
600	5	1,04	3,50	10,51
	10	1,00	3,69	10,06
	15	0,92	4,34	10,26