



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**“CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE UNA CELDA PARA
DETERMINAR LA TENSION SUPERFICIAL MEDIANTE EL
MÉTODO DE BURBUJA ASCENDENTE”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

LEONEL ARMANDO GALLEGOS GLORIA



CDMX

2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: SILVIA DEL SOCORRO PÉREZ CASAS
VOCAL: FRANCISCO JAVIER GARFIAS VÁSQUEZ
SECRETARIO: MARÍA GUADALUPE LEMUS BARAJAS
1° SUPLENTE: JOSÉ LUIS LÓPEZ CERVANTES
2° SUPLENTE: ANDRÉS ADOLFO VELASCO MEDINA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**LABORATORIO DE INGENIERÍA ELECTROQUÍMICA 104, EDIFICIO F2,
FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD UNIVERSITARIA**

ASESOR DEL TEMA:

FRANCISCO JAVIER GARFIAS VÁSQUEZ

SUSTENTANTE:

LEONEL ARMANDO GALLEGOS GLORIA

Dedicatoria

*A mi madre Sandra Liselotte Gloria Greimel,
a mi padre Sergio Gallegos González,
y a mis Opas,
quienes nunca han dejado de creer en mí
y han sido siempre mi guía a seguir.*

Agradecimientos

Quiero agradecerle a Dr. Francisco Javier Garfias Vásquez por la dirección de esta tesis y el apoyo incondicional que siempre me ha brindado como profesor, mentor y amigo.

A la Facultad de Química por formarme como profesional y a la Universidad por mi formación académica, artística y deportiva a través de toda mi vida.

A los miembros de mi jurado por sus palabras de aliento y en especial al Dr. José Luis López Cervantes y al Mtro. Andrés Adolfo Velasco Medina por estar siempre pendiente de mi investigación y alentarme a ser un mejor profesionista.

A Adolfo López Ángeles, quien gracias a su colaboración en la construcción del equipo experimental fue posible llevar a cabo este trabajo de investigación.

A mis compañeros de laboratorio Tania, Vianey, David y Priscila por su apoyo y entusiasmo lo que me impulsó siempre a seguir adelante y a resolver los problemas desde puntos de vista diferentes e innovadores.

A mi gran amigo Ricardo Gómez Alonso, gracias todo tu apoyo, cariño, amistad, confianza y entusiasmo, sin el cual no hubiera sido posible llegar al término de este camino.

A Alexander Martínez Hristova y Francisco Martínez Marcué, por el cariño y el gran apoyo que me brindaron en mis momentos más difíciles y siempre motivarme a alcanzar mis sueños.

A Diego Franco Klein y familia, que me han acogido como parte de su familia y me han impulsado concluir y a ser mejor persona cada día.

Y a Mauricio Martínez Berthely, quien me ha acompañado y brindado su amistad durante toda mi vida y ha sido siempre una inspiración para nunca dejarme derrotar sin importar la adversidad.

Índice general

Justificación	8
Objetivo General.....	8
Objetivos particulares	8
Introducción.....	9
Capítulo 1 Físicoquímica de Superficies.....	11
1.1 Generalidades de la termodinámica de superficies	11
1.2 Tensión superficial en líquidos puros	11
1.3 Tensión superficial en soluciones.....	13
1.4 Potenciales termodinámicos en sistemas cerrados	14
1.4.1 Primera ley de la termodinámica	14
1.4.2 Energía interna	15
1.4.3 Entalpía.....	15
1.4.4 Energía libre.....	16
1.4.5 Energía libre de Helmholtz	16
1.4.6 Energía libre de Gibbs.....	17
1.5 Potenciales termodinámicos aplicados a superficies	17
Capítulo 2 Ecuación de Young-Laplace	19
Capítulo 3 Fuerzas intermoleculares	32
3.1 Fuerzas entre moléculas no polares (fuerzas de dispersión de London)	33
3.2 Fuerzas entre dipolos permanentes	33
3.3 Dipolos inducidos	33
3.4 Enlaces de hidrógeno	34

Capítulo 4	Métodos de medición de tensión superficial.....	35
4.1	Generalidades acerca de los métodos de medición	35
4.2	Métodos por adhesión.....	37
4.2.1	Anillo de Du Noüy	38
4.2.2	Placa de Wilhelmy.....	39
4.3	Métodos de forma y de presión	40
4.3.1	Presión máxima de burbuja.....	40
4.3.2	Gota pendiente	41
Capítulo 5	Método de burbuja ascendente desde un capilar sumergido	42
5.1	Modelos de análisis de burbuja ascendente.....	49
5.1.1	Modelos basados en un balance de fuerza	49
5.1.2	Modelo basado en un balance de presiones sobre la interfase	55
5.1.3	Modelo basado en el número de Bond.....	58
5.1.4	Método de relación de diámetros	59
Capítulo 6	Propiedades del agua, alcoholes y soluciones electrolíticas	62
6.1	Agua	62
6.2	Alcoholes	62
6.3	Soluciones electrolíticas.....	66
Capítulo 7	Desarrollo experimental	71
7.1	Construcción y arreglo de la celda de burbuja ascendente diseñada por del doctor Garfias, F. J.	71
7.2	Metodología para la determinación de la tensión superficial cuasi-estática mediante el crecimiento de burbuja.	78
7.2.1	Procedimiento experimental.....	78
7.2.2	Tratamiento de imágenes mediante MATLAB®	81
7.2.3	Determinación de la tensión superficial mediante MATLAB®	82
Capítulo 8	Resultados.....	84
8.1	Crecimiento cuasi-estático de una burbuja.....	84
8.2	Comparación entre la Celda construida y un equipo de referencia.....	88
8.3	Ejemplos de determinación de tensión superficial por experimentación	90
8.4	Resultados de tensión superficial	94

8.4.1	Agua	94
8.4.1	Alcoholes	100
8.4.1	Soluciones electrolíticas.....	106
Capítulo 9 Discusión.....		118
9.1	Construcción de la celda.....	118
9.2	Programación.....	124
9.3	Análisis de resultados	127
9.3.1	Agua	127
9.3.1	Alcoholes	131
9.3.2	Soluciones electrolíticas.....	135
Conclusiones.....		143
Recomendaciones.....		144
Referencias		145
Anexo A.....		152
Anexo B.....		154
	Procesamiento de imágenes e información	154
Índice de Tablas		169
Índice de Gráficas		170
Índice de Figuras		171
Simbología.....		174

Justificación

Debido a los altos costos de los tensiómetros comerciales y la necesidad de medir la tensión superficial en los trabajos de laboratorio de ingeniería electroquímica, se decidió llevar a cabo la construcción de un tensiómetro basado en la técnica de crecimiento de burbuja cuasi-estática a partir del trabajo del Dr. Francisco Javier Garfias y Ayala. Se espera que este equipo permita obtener información relevante de los aditivos utilizados y de las soluciones electrolíticas elaboradas.

Objetivo General

Diseño, construcción y puesta en operación de una celda para determinar la tensión superficial cuasi-estática, basada en el método de burbuja ascendente.

Objetivos particulares

Plantear los modelos matemáticos y las bases de operación de la celda de burbuja ascendente.

Determinar la tensión superficial cuasi-estática de alcoholes y soluciones electrolíticas mediante el modelo de Young-Laplace y la programación elaborada en MATLAB®.

Evaluar los datos obtenidos mediante la celda, al compararlos con datos experimentales reportados en libros y publicaciones.

Introducción

En la vida cotidiana estamos en contacto con fenómenos de superficie en diversidad de actividades, actividades tan simples como al agregar jabón al agua. Al momento que agregamos un tensoactivo (jabón) al agua, se cambian las propiedades de superficie y consecuentemente su tensión superficial.

El estudio de los fenómenos de superficie tiene gran un impacto en nuestro día a día, en la industria química y en la industria petroquímica, por ejemplo al cambiar las propiedades físicas de crudo y mejorar la recuperación del mismo en los yacimientos (Fathinasab, Ayatollahi, Taghikhani, y Shokouh, 2018; Kazemzadeh, Eshraghi, Riazi, y Zendeboudi, 2018; Wang, Zhang, Zhao, Ai, y Yang, 2018; Yu, Dong, Ding, y Yuan, 2018; Zhang, Wang, Song, Qu, y Liu, 2018), dentro de los procesos poliméricos, en la creación de películas poliméricas en la interfaz agua/aire (Hasan y col., 2018; H. Li y col., 2018; Xie, Chen, Chen, y Liu, 2018) o sobre materiales sólidos con efectos específicos como bactericidas (Shi y col., 2017), en la medicina como indicador de ciertas patologías, como herramienta para monitorear la eficiencia de tratamientos (Fainerman, Trukhin, Zinkovych, y Miller, 2018; Mizev, Shmyrova, Mizeva, y Pshenichnikova-Peleneva, 2018), en la industria alimenticia (Cai y col., 2018; J. Li y col., 2018), en el desarrollo de nuevos materiales como autoensamblaje de nanopartículas (Tahghighi, Mannelli, Janner, y Ignés-Mullol, 2018) y nuevas técnicas para diseñar mezclas o compuestos multicomponentes (Koh, Zhang, Kong, y He, 2018).

La tensión superficial se debe al hecho que el comportamiento de las moléculas en una interfaz es diferente al que se tiene en el seno de la sustancia, sin importar si esta se encuentra en fase sólida, líquida o gaseosa. En el caso de líquidos, las fuerzas de atracción resultantes en el seno del líquido se encuentran en equilibrio, mientras que aquellas que se encuentran en la superficie no lo están debido a que la dirección de la suma de estas fuerzas es hacia el seno del líquido. Como consecuencia de lo anterior, el sistema busca el estado de menor energía

reduciendo al mínimo posible el área superficial, el número de moléculas en la superficie y el orden de las mismas (Modlińska, Chrzumnicka, y Martyński, 2017).

Para determinar la tensión superficial se pueden emplear diferentes métodos, con los cuales es posible determinar la tensión superficial estática o dinámica de un líquido, dependiendo del caso de estudio. Franses, Basaran y Chang (1996) dividen los métodos para medir la tensión superficial en los siguientes grupos:

- Métodos de adhesión
- Métodos a partir de la forma o geometría de la interfaz
- Métodos basados en la diferencia de presiones en la interfaz
- Métodos mediante caudales

Dentro de los métodos a partir de la forma de la interfaz, la técnica de burbuja ascendente es capaz de medir la tensión superficial estática o dinámica (Franses, Basaran, y Chang, 1996).

Para este estudio se busca determinar la tensión superficial del agua, alcoholes y soluciones electrolíticas mediante el crecimiento de una burbuja ascendente, donde el método relaciona, mediante la ecuación de Young-Laplace, la tensión superficial y la forma simétrica axial (o figura de revolución) de la burbuja. Otros factores que esta ecuación toma en cuenta son la densidad del líquido a evaluar y del gas, la presión del líquido y del gas en la interfaz de la burbuja y la gravedad local donde se lleva a cabo la medición complementado con la suposición que el sistema se encuentra en equilibrio al momento de efectuar las mediciones.

Con base a lo anterior, se denota la importancia que conlleva la obtención de datos de tensión superficial confiables. Es por esto que en este trabajo el objetivo es obtener un equipo y metodología que resulte en datos experimentales confiables.

Capítulo 1

Fisicoquímica de Superficies

1.1 Generalidades de la termodinámica de superficies

Cuando dos fases parcialmente inmiscibles se encuentran en contacto, se forma una región tridimensional, que puede ser considerada como una fase distinta que presenta un espesor finito, del orden de algunos diámetros moleculares. A esta región se le denomina interfase y representa una zona de transición donde las características físicas y químicas difieren a las del seno del líquido, debido al desequilibrio de fuerzas de atracción entre las moléculas en esta zona (Birdi, 2002). Existen dos conceptos concernientes al postulado anterior, uno es la tensión interfacial, que se da al momento de encontrarse en contacto dos fases contiguas (líquido-líquido, sólido-líquido y sólido-sólido), y la tensión superficial, que se da al momento de encontrarse una fase líquida o sólida en contacto con un gas o un vapor (Ebnesajjad, 2011). Conforme a la IUPAC (2014), se denomina tensión superficial al trabajo requerido para incrementar el área superficial de un líquido por unidad de área.

1.2 Tensión superficial en líquidos puros

Si se hace una analogía entre un líquido puro y un sólido cristalino, se puede considerar que las moléculas que los conforman son esféricas y estas se encuentran ordenadas dentro de un empaquetamiento compacto. Las fuerzas internas dentro del líquido, la energía interna o energía cohesiva, son las que determinan la magnitud de la tensión superficial (Birdi, 2002). En la Figura 1.1 se muestra un esquema de empaquetamiento compacto en dos dimensiones, donde se observa que las moléculas en el seno del líquido tienen cuatro vecinos cercanos y aquellas que se encuentran en la superficie únicamente tres.

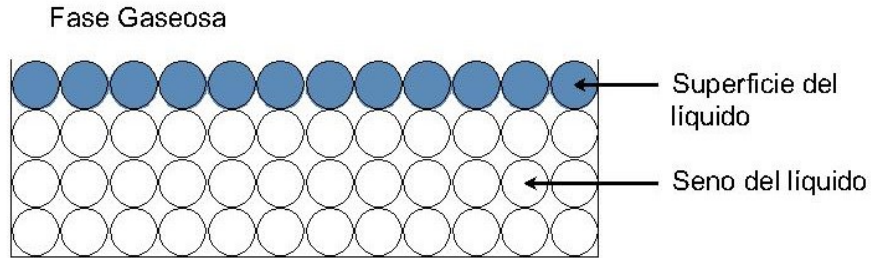


Figura 1.1 Empaquetamiento molecular en dos dimensiones (Birdi, 2009, p. 11)

En la Figura 1.2 se muestra que las fuerzas que actúan sobre las moléculas de un líquido varían dependiendo de la posición de estas, siendo el campo de fuerzas uniforme en el seno del líquido y asimétrico en la superficie. La energía promedio de las moléculas en la superficie es mayor que aquellas situadas en el seno del líquido debido a que experimentan menos atracciones con otras moléculas. Con base en la Figura 1.2, las fuerzas de atracción de las moléculas en la superficie del líquido son laterales y hacia el interior de este, actuando como una membrana estirada, resultando en la contracción de la superficie, razón por la cual las gotas de un líquido tienden a adoptar una forma esférica o estado de menor energía, que corresponde al estado más estable de un sistema (Birdi, 2002; Levine, 2009).

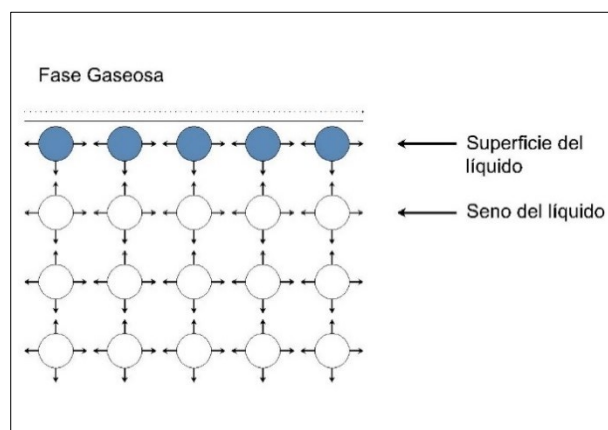


Figura 1.2 Fuerzas atractivas en el seno de un líquido y en la superficie. Tomado de Osorio (1998, p. 2)

Si se considera que el número de moléculas en la interfase es proporcional al área interfacial, a , un incremento del área, da , debido a un trabajo reversible, es proporcional al incremento en el número de moléculas en la interfase. La constante de proporcionalidad del trabajo requerido para incrementar el área, a , es la *tensión interfacial*, γ , o la *tensión superficial*, σ , y la magnitud de esta constante depende de la naturaleza de las fases en contacto. Por lo tanto, el trabajo requerido para incrementar el área interfacial es " γda ". Cuando una de las fases es un gas el término comúnmente empleado es *tensión superficial* (Levine, 2009, p. 229).

El Sistema Internacional (SI) emplea las unidades newton por metro ($\frac{N}{m}$) para la tensión interfacial y puede ser simbolizada por las letras griegas sigma " σ " o gamma " γ ". (IUPAC, 2014, p. 1499).

1.3 Tensión superficial en soluciones

La diferencia que existe entre la tensión superficial de un líquido puro y una disolución es debida a la relación que existe entre las características del soluto (tales como la forma, el tamaño, naturaleza química, ...) y el disolvente. El efecto del soluto puede causar entonces un aumento o disminución de la tensión superficial. Para el caso de las soluciones acuosas se pueden dividir efectos debidos al soluto en tres grupos o tipo de solución:

Soluciones del Tipo I:

Son soluciones donde el soluto tiene el efecto de incrementar la tensión superficial del disolvente. Este comportamiento es debido a la presencia de electrolitos fuertes (por ejemplo NaCl, KCl, Na₂SO₄, etc.) en solución acuosa (Birdi, 2010).

Soluciones del Tipo II:

En este tipo de soluciones el soluto tiende a disminuir la tensión superficial con cierta regularidad conforme aumenta su concentración en la solución acuosa. Los solutos responsables de este comportamiento son electrolitos débiles y solutos no electrolitos como el etanol y metanol (Birdi, 2010).

Soluciones del Tipo III:

La característica principal de este tipo de soluciones es el hecho que el soluto abate la tensión superficial del agua considerablemente aún a bajas concentraciones. Los solutos que logran este efecto son principalmente agentes tensoactivos que se adsorben en la superficie del líquido (Birdi, 2010).

1.4 Potenciales termodinámicos en sistemas cerrados

1.4.1 Primera ley de la termodinámica

Cuando se observa un fenómeno, lo que se observa es un cambio en la energía asociada a un sistema, la cual es descrito mediante el calor transferido al sistema, dQ , y/o el trabajo efectuado por el sistema, dW . Este postulado es la base de *la primera ley de la termodinámica o ley de la conservación de la energía*, la cual establece que la energía no crea ni se destruye, solo se transforma. Para un sistema cerrado homogéneo esta ley se expresa como:

$$dQ = dU + dW \quad (1.1)$$

donde dU es el cambio en la energía interna total del sistema.

1.4.2 Energía interna

Para sistemas cerrados y con cambios infinitesimales reversibles:

$$dU = dQ_{rev} - dW_{rev} \quad (1.2)$$

$$dQ_{rev} = TdS \quad (1.3)$$

$$dW_{rev} = -pdV \quad (1.4)$$

$$dU = TdS - pdV \quad (1.5)$$

Donde el trabajo mecánico sobre el sistema, pdV , depende únicamente del cambio en el volumen. Si el sistema contiene una interfaz, el trabajo efectuado puede modificar el área y el volumen del líquido adyacente.

$$dW = -pdV + \sigma da \quad (1.6)$$

donde σ es la tensión superficial y a es el área interfacial (Levine, 2009).

1.4.3 Entalpía

La entalpía es una función de estado mediante la cual se determinan los cambios térmicos o el contenido calórico de un sistema,

$$H = U + pV \quad (1.7)$$

Si se tiene un cambio diferencial se obtiene:

$$dH = dU + pdV + Vdp \quad (1.8)$$

Sustituyendo la ecuación (1.5) en la ecuación (1.8) se obtiene (Levine, 2009):

$$dH = TdS + Vdp \quad (1.9)$$

1.4.4 Energía libre

El término de energía libre hace referencia al máximo de energía disponible para llevar a cabo un proceso. Esto tiene fundamento en el hecho de que el trabajo máximo que puede proporcionar un proceso no necesariamente es igual a la cantidad total de energía disponible para efectuar un trabajo útil, aunque el proceso se lleve a cabo reversiblemente. (Levine, 2009)

1.4.5 Energía libre de Helmholtz

La energía libre de Helmholtz es descrita como el trabajo producido en una transformación isotérmica igual o menor que la disminución en la función trabajo (Levine, 2009),

$$A = U - TS \quad (1.10)$$

Al derivar la ecuación (1.10) se obtiene:

$$dA = dU - TdS - SdT \quad (1.11)$$

Que al sustituir dU de la ecuación (1.5) en la ecuación (1.11) se obtiene:

$$dA = -pdV - SdT \quad (1.12)$$

1.4.6 Energía libre de Gibbs

La disminución de la energía libre de Gibbs, G , es igual a la cantidad máxima de trabajo reversible por encima del trabajo de expansión que se obtiene en una transformación a presión y temperatura constante (Levine, 2009).

$$G = H - TS \quad (1.13)$$

Al derivar la ecuación (1.13) se obtiene:

$$dG = dH - TdS - SdT \quad (1.14)$$

Al sustituir la ecuación (1.9) en la ecuación (1.14) se obtiene:

$$dG = Vdp - SdT \quad (1.15)$$

1.5 Potenciales termodinámicos aplicados a superficies

Para sistemas abiertos multicomponente, donde el sistema puede intercambiar materia con sus alrededores las ecuaciones termodinámicas se definen como (Levine, 2009):

$$dU = TdS - pdV + \sum_i \mu_i dn_i \quad (1.16)$$

$$dH = TdS + Vdp + \sum_i \mu_i dn_i \quad (1.17)$$

$$dA = -pdV - SdT + \sum_i \mu_i dn_i \quad (1.18)$$

$$dG = Vdp - SdT + \sum_i \mu_i dn_i \quad (1.19)$$

Si se toma en cuenta el efecto superficial sobre los potenciales termodinámicos las ecuaciones toman la siguiente forma:

$$dU = TdS - pdV + \sigma da + \sum_i \mu_i dn_i \quad (1.20)$$

$$dH = TdS + Vdp + \sigma da + \sum_i \mu_i dn_i \quad (1.21)$$

$$dA = -pdV - SdT + \sigma da + \sum_i \mu_i dn_i \quad (1.22)$$

$$dG = Vdp - SdT + \sigma da + \sum_i \mu_i dn_i \quad (1.23)$$

donde la tensión superficial se puede definir como:

$$\sigma = \left(\frac{\partial U}{\partial a} \right)_{S,V,n_i} \quad (1.24)$$

$$\sigma = \left(\frac{\partial A}{\partial a} \right)_{T,V,n_i} \quad (1.25)$$

$$\sigma = \left(\frac{\partial G}{\partial a} \right)_{T,P,n_i} \quad (1.26)$$

Capítulo 2

Ecuación de Young-Laplace

La ecuación de Young-Laplace consiste en una relación entre la diferencia de presión en la interfaz (presión interna y externa), Δp , y el producto de la tensión superficial, σ_{lg} , con el inverso de los radios de curvatura, R_1 y R_2 , de una superficie con simetría axial.

$$\Delta p = \sigma_{lg} \left[\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right] \quad (2.1)$$

Para demostrar y posteriormente resolver la ecuación (2.1), se utiliza la ecuación de la Energía Libre de Helmholtz. Si se considera la superficie de una esfera, o parte de una, la Energía Libre de Helmholtz se expresa de la siguiente manera (Flood & Benson, 1968):

$$A = U - TS + \sigma a \quad (2.2)$$

Para resolver la ecuación (2.2), primero se reordena la ecuación (1.13)

$$H = -TS + G \quad (2.3)$$

la ecuación (2.3) se sustituye en la ecuación (1.7) y reordenada en función de la energía interna del sistema, U , se obtiene:

$$U = -pV + TS + G \quad (2.4)$$

sustituyendo la ecuación (2.4) en la (2.2):

$$A = (-pV + TS + G) - TS + \sigma a \quad (2.5)$$

que al resolverla se expresa como:

$$A = -pV + G + \sigma a \quad (2.6)$$

Al expresar a la Energía Libre de Gibbs, G , en función de su potencial químico, la ecuación (2.6) toma la siguiente forma:

$$A = -pV + \sum \mu_i n_i + \sigma a \quad (2.7)$$

En el caso particular que no exista un cambio en la composición, $\sum \mu_i n_i$ se considera constante, C_1 .

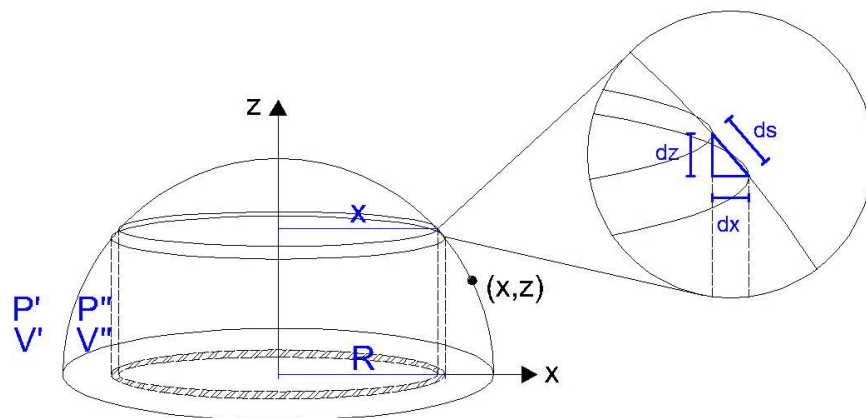


Figura 2.1 Diagrama de un cuerpo con simetría axial (gota o burbuja)

Tomando en consideración la presión y volumen tanto dentro como fuera de la burbuja o gota (ver Figura 2.1), la ecuación (2.7) toma la siguiente forma:

$$A = \sigma a - p'V' - p''V'' + C_1 \quad (2.8)$$

Donde p' y V' son la presión y el volumen en el exterior de la burbuja o gota respectivamente y p'' y V'' son la presión y el volumen en el interior de la misma. Si se considera que, $V = V' + V''$, entonces:

$$A = \sigma a - p''V'' - p'(V - V'') + C_1 \quad (2.9)$$

Que al reordenar la ecuación (2.9) se obtiene:

$$A = \sigma a + V''(p' - p'') - p'V + C_1 \quad (2.10)$$

Si se considera que $-p'V + C_1 = C_2$, la ecuación (2.10) toma la forma:

$$A = \sigma a + V''(\Delta p) + C_2 \quad (2.11)$$

Para encontrar la forma óptima o de mínima energía que corresponda con la ecuación (2.11) se expresa la energía de Helmholtz, A , en términos de (x,z) . Para resolver este sistema, se considera un área diferencial lo suficientemente pequeña sobre la curva para que de esta manera se asuma que la sección de la curva es una recta, tal y como se muestra en las Figura 2.1 y Figura 2.2.

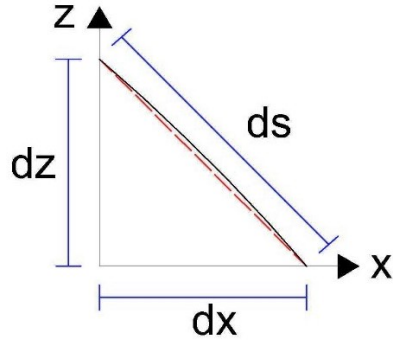


Figura 2.2 Diagrama de un área diferencial sobre la curva. a) La línea negra continua es una sección de la curva y b) la línea intermitente en color rojo es la aproximación de una recta

Con base en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y aplicando el teorema de Pitágoras se obtiene la siguiente ecuación:

$$ds^2 = dx^2 + dz^2 \quad (2.12)$$

Haciendo uso de esta aproximación se resuelven el área (a) y el volumen (V'') de una sección de la esfera expresados en la ecuación (2.11).

$$da = 2\pi x ds \quad (2.13)$$

$$dV'' = z(2\pi x dx) \quad (2.14)$$

reordenando la ecuación (2.12), se obtiene:

$$ds^2 = dx^2 \left[1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right] \quad (2.15)$$

para posteriormente obtener:

$$ds = dx \left[1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.16)$$

Al sustituir $\left(\frac{dz}{dx} \right)$ por z_x en la ecuación (2.16) la ecuación se expresa como:

$$ds = dx [1 + (z_x)^2]^{1/2} \quad (2.17)$$

Sustituyendo la ecuación (2.17) en la ecuación (2.13) se obtiene:

$$da = 2\pi x [1 + (z_x)^2]^{1/2} dx \quad (2.18)$$

Integrando la ecuación (2.18) conforme al radio R , de la sección de la esfera elegida respecto al área, se obtiene la siguiente ecuación,

$$a = \int_0^R 2\pi x [1 + (z_x)^2]^{1/2} dx \quad (2.19)$$

Con respecto al volumen de la sección de la esfera, dV'' , esta también se integra conforme al radio, R , de la sección de la esfera, obteniendo así:

$$V'' = \int_0^R 2\pi z x dx \quad (2.20)$$

Sustituyendo la ecuación (2.19) y (2.20) en la ecuación (2.11) se obtiene,

$$A = \int_0^R \left[2\pi\sigma x [1 + (z_x)^2]^{\frac{1}{2}} + 2\pi z x \Delta p \right] dx + C_2 \quad (2.21)$$

Al observar la ecuación anterior, se denota que la Energía Libre de Helmholtz no es una función explícita de x , sino un funcional. Dicho en otras palabras, es una función cuyo argumento es una función.

$$A = \int_0^R f(x, z, z_x) dx \quad (2.22)$$

Para resolver la ecuación se aplica la siguiente condición:

$$\frac{\partial f}{\partial z} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial f}{\partial z_x} \right) = 0 \quad (2.23)$$

Donde el funcional, f , se describe en la siguiente ecuación:

$$f = 2\pi\sigma x [1 + z_x]^{\frac{1}{2}} + 2\pi x z \Delta p \quad (2.24)$$

Al derivar la ecuación (2.24) parcialmente con respecto a z se obtiene:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)_{x,y,z_x} = 2\pi x \Delta p \quad (2.25)$$

y al derivar la ecuación (2.24) parcialmente con respecto a “ z_x ” el resultado es:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial z_x}\right)_{x,y,z} = (\sigma 2\pi x) \left(\frac{1}{2}[1 + z_x]^{-\frac{1}{2}}\right) (2z_x) \quad (2.26)$$

la ecuación (2.26) al ser derivada con respecto a x se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial f}{\partial z_x}\right) &= \sigma 2\pi x \left[z_x (1 + z_x^2)^{-\frac{1}{2}} + x z_{xx} (1 + z_x^2)^{-\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. - x z_x \frac{1}{2} (1 + z_x^2)^{-\frac{3}{2}} 2 z_x z_{xx} \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

Efectuando algebra sobre los dos últimos términos de la ecuación (2.27)

$$\begin{aligned} &x z_{xx} (1 + z_x^2)^{-\frac{1}{2}} - x z_x \frac{1}{2} (1 + z_x^2)^{-\frac{3}{2}} 2 z_x z_{xx} \\ &= x z_{xx} (1 + z_x^2)^{-\frac{1}{2}} - x z_x^2 z_{xx} (1 + z_x^2)^{-\frac{3}{2}} \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$= x z_{xx} (1 + z_x^2)^{-\frac{1}{2}} \left[1 - \frac{z_x^2}{1 + z_x^2} \right] \quad (2.29)$$

$$= x z_{xx} (1 + z_x^2)^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{1 + z_x^2} \right] \quad (2.30)$$

$$= x z_{xx} (1 + z_x^2)^{-\frac{3}{2}} \quad (2.31)$$

De tal forma que la ecuación (2.27) se puede reescribir como:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial f}{\partial z_x} \right) = \sigma 2\pi x \left[z_x (1 + z_x^2)^{-\frac{1}{2}} + x z_{xx} (1 + z_x^2)^{-\frac{3}{2}} \right] \quad (2.32)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.25) y (2.32) en la ecuación (2.23):

$$2\pi x \Delta p - \sigma 2\pi x \left[z_x (1 + z_x^2)^{-\frac{1}{2}} + x z_{xx} (1 + z_x^2)^{-\frac{3}{2}} \right] = 0 \quad (2.33)$$

Despejando Δp de la ecuación (2.33) se obtiene la forma general de la ecuación de Young-Laplace para superficies con simetría axial,

$$\Delta p = \sigma \left[\frac{z_x}{x(1 + z_x^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{z_{xx}}{(1 + z_x^2)^{\frac{3}{2}}} \right] = \sigma \left[\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right] \quad (2.34)$$

La ecuación (2.34) es entonces equivalente a la ecuación (2.1).

Un caso particular, es cuando se hace la suposición que Δp es constante en toda la superficie de la interfase y que la ecuación representa solo una sección de una esfera dando como resultado $R_1 = R_2$, que al aplicar la suposición en la ecuación (2.34) se obtiene:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R} \quad (2.35)$$

Esta expresión se puede demostrar si se considera que la superficie es esférica.

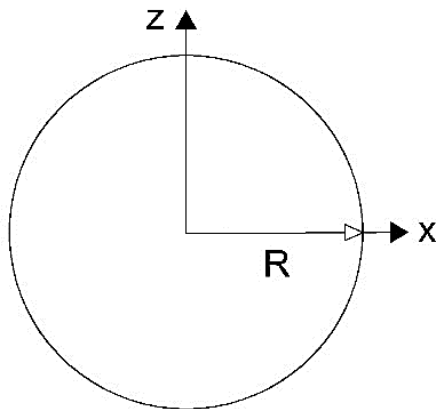


Figura 2.3 Diagrama de un círculo de radio R

Si se considera que el perfil tiene la forma de un círculo, Figura 2.3, la ecuación que lo define es:

$$z^2 + x^2 = R^2 \quad (2.36)$$

Al diferenciar la ecuación (2.36) con respecto a x

$$2zz_x + 2x = 0 \quad (2.37)$$

Despejando z de la ecuación (2.37)

$$z = -\frac{x}{z_x} \quad (2.38)$$

Dividiendo la ecuación (2.37) entre 2 y diferenciándola con respecto a x

$$(z_x)^2 + zz_{xx} + 1 = 0 \quad (2.39)$$

Despejando z de la ecuación (2.39)

$$z_{xx} = -\frac{1 + z_x^2}{z} \quad (2.40)$$

Conforme a la ecuación (2.34)

$$\frac{1}{R_1} = \frac{z_{xx}}{(1 + z_x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.41)$$

Al sustituir la ecuación (2.40) en la ecuación (2.41),

$$\frac{1}{R_1} = \frac{-\frac{1+z_x^2}{z}}{(1+z_x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.42)$$

Al sustituir la ecuación (2.38) en la ecuación (2.42)

$$\frac{1}{R_1} = \frac{-\frac{1+z_x^2}{-\frac{x}{z_x}}}{(1+z_x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{z_x(1+z_x^2)}{x(1+z_x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.43)$$

Obteniendo así

$$\frac{1}{R_1} = \frac{z_x}{x(1+z_x^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{R_2} \quad (2.44)$$

Con lo que se concluye que R_1 y R_2 son iguales cuando se aplica la ecuación de Young-Laplace dentro de una esfera.

Un segundo método para obtener el radio de curvatura R_1 es mediante un método geométrico donde:

$$\tan\theta = \frac{dz}{dx} = z_x \quad (2.45)$$

Por lo tanto,

$$\theta = \tan^{-1}z_x \quad (2.46)$$

Que al ser derivada la ecuación (2.46) se obtiene:

$$d\theta = d(\tan^{-1}z_x) = \frac{z_{xx} dx}{(1 + (z_x)^2)} \quad (2.47)$$

Por otra parte, la relación entre la longitud del arco, s , y las variables cartesianas, (x, z) , se puede expresar de la siguiente manera:

$$ds = (dx^2 + dz^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.48)$$

Arreglando la ecuación (2.48),

$$ds = (1 + (z_x)^2)^{\frac{1}{2}} dx \quad (2.49)$$

Al combinar la ecuación (2.47) y (2.49) se obtiene:

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{\frac{z_{xx} dx}{(1 + (z_x)^2)}}{(1 + (z_x)^2)^{\frac{1}{2}} dx} = \frac{z_{xx}}{(1 + z_x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{R_1} \quad (2.50)$$

Donde se obtiene la misma forma para R_1 que en la ecuación (2.41).

Capítulo 3

Fuerzas intermoleculares

Las propiedades de las sustancias puras o mezclas dependen de la interacción que existe entre las moléculas debido a las *fuerzas intermoleculares*. Estas fuerzas permiten, por ejemplo, que las moléculas en los líquidos se mantengan unidas y al mismo tiempo les permite moverse y rotar. Las fuerzas intermoleculares pueden llegar a ser tan fuertes como un enlace covalente, pero con la diferencia que estas son producto de perturbaciones en la distribución de la carga electrónica de los átomos, a diferencia de un enlace covalente, donde la distribución de cargas cambia por completo y se fusionan los átomos (Israelachvili, 2011a; Prausnitz, Lichtenthaler, y Gomes de Azevedo, 1999).

La mejor clasificación de las fuerzas intermoleculares, según Israelachvili (2011b), es con base en su origen físico o químico y debe tomarse en cuenta el tamaño de partícula o su superficie. El primer grupo son las fuerzas de origen puramente electrostático; interacciones entre cargas, iones, interacciones de polarización (dipolos permanentes, cuatripolos, dipolo inducidos), etc. Israelachvili (2011b) indica que todas las interacciones electrostáticas en un medio solvente implican efectos de polarización y estas son generalmente atractivas cuando las moléculas son libres de orientarse. El segundo grupo está conformado por las fuerzas de origen puramente entrópico y surgen a partir del comportamiento colectivo de las moléculas; *la presión* de un gas, la fuerza osmótica y algunas fuerzas de fluctuación térmica. El tercer grupo lo constituyen las fuerzas de naturaleza mecánica cuántica; fuerzas de dispersión de Van der Waals, interacciones ácido-base y de transferencia de carga al igual que las fuerzas estéricas repulsivas que equilibran las fuerzas de atracción a distancias muy cortas (debido al principio de exclusión de Pauli).

3.1 Fuerzas entre moléculas no polares (fuerzas de dispersión de London)

Las fuerzas de London o de dispersión son causadas por momentos dipolares temporales. El momento dipolar de una molécula es igual al promedio de momentos dipolares y si se considera que la nube electrónica es esférica esto implica que su momento dipolar es igual a cero y que la distribución de electrones es uniforme. Si se acercan dos moléculas con estas características, cada uno tiene un *momento dipolar momentáneo* y los movimientos electrónicos de los átomos se acoplan por la interacción eléctrica de los *dipolos instantáneos*. Por otra parte, la energía de dispersión es mayor conforme mayor sea el volumen de la molécula (Levine, 2009; Prausnitz y col., 1999).

3.2 Fuerzas entre dipolos permanentes

Cuando la distribución de los electrones en una molécula es asimétrica debido a sus enlaces esta adquiere lo que se denomina un momento dipolar permanente. La fuerza de atracción entre los dipolos, o moléculas polares, pueden reorientar a las moléculas de modo que se alineen produciendo una atracción mutua y por lo tanto un arreglo más estable. A esta fuerza de atracción se le llama fuerza dipolo-dipolo (Birdi, 2010).

3.3 Dipolos inducidos

Las moléculas polares (dipolos permanentes) tienen la capacidad de distorsionar la nube electrónica de las moléculas cercanas a ellas induciéndolas a un momento dipolar y causando siempre una atracción debido a sus cargas. Esta polarización dependerá de la capacidad de polarización inherente y del campo polarizante producido. A estas fuerzas se les conoce como ion-dipolo inducido o dipolo-dipolo inducido (Levine, 2009; Prausnitz y col., 1999).

3.4 Enlaces de hidrógeno

Un puente de hidrógeno no es un enlace verdadero sino una atracción fuerte entre dos dipolos formados debido a la alta electronegatividad de átomos como el oxígeno (O), el cloro (Cl), el flúor (F) y el nitrógeno (N). Ese enlace se forma entre dos átomos altamente electronegativos con el hidrógeno. Este fenómeno sucede debido a que el hidrógeno tiene una gran afinidad hacia los electrones no compartidos y forma agregados o redes intermoleculares con los electrones no compartidos de los átomos de flúor, oxígeno o nitrógeno. Una consecuencia de estas interacciones son las altas temperaturas de ebullición del agua, amoníaco, alcoholes, aminas y fluoruro de hidrógeno (Birdi, 2002; Levine, 2009; Prausnitz y col., 1999).

Capítulo 4

Métodos de medición de tensión superficial

4.1 Generalidades acerca de los métodos de medición

La determinación de la tensión superficial (o interfacial) puede efectuarse a partir de la fuerza de adhesión líquido-sólido (donde puede o no haber un rompimiento de la superficie), la forma o geometría de la interfaz, la diferencia de presión o caudales (donde no se busca romper la superficie) (Ebnesajjad, 2011; Franses y col., 1996).

Los fenómenos asociados a la medición de la tensión superficial, tales como gotas, burbujas, meniscos, chorros de líquido y películas delgadas, están directamente relacionado con la tensión superficial estática o dinámica, según sea el caso. En la Figura 4.1, se muestran algunos métodos para determinar la tensión superficial, donde la elección del método dependerá del sistema, la tensión superficial que se desea medir (estática o dinámica), la naturaleza de la interfase, la reología del líquido, el valor esperado de tensión superficial, el intervalo de presiones y la temperatura, la edad de superficie requerida, la facilidad del análisis, precisión, velocidad, y consideraciones prácticas de conveniencia, costo y combinación con otras técnicas de sondeo de superficies (por ejemplo la espectroscopia de generación de suma de frecuencias *SFG* (Friedbacher & Bubert, 2011)), así como la composición de la superficie a evaluar (Franses y col., 1996).

Muchas de las técnicas que se presentan a continuación utilizan el enfoque llamado cuasi-estático, donde se asume que la tensión superficial dinámica, $\sigma(t)$, afecta la forma (o la presión, o la fuerza) de la interfaz de igual manera que la tensión superficial en el equilibrio, σ_e , (Franses y col., 1996).

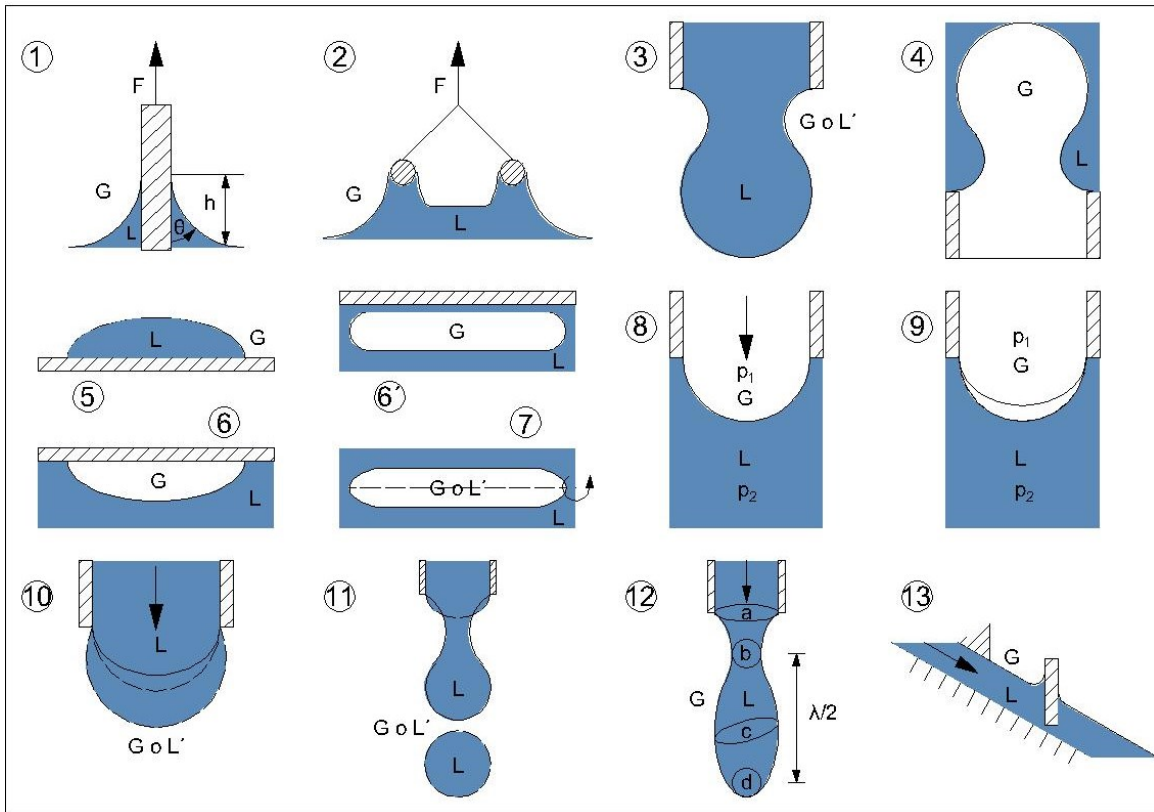


Figura 4.1 Esquema de algunas configuraciones experimentales para medir la tensión superficial dinámica. (1) Método de la placa de Wilhelmy (se mide F (fuerza), h (ascenso capilar en la pared) y θ (ángulo de contacto dinámico); (2) Método de Anillo de Du Noüy; (3) Método de gota pendiente; (4) Método de burbuja emergente; (5) Método de gota sésil; (6) Método de burbuja cautiva; (6') Método de burbuja cautiva de Schürch y colaboradores; (7) Método de burbuja o gota giratoria; (8) Método de presión máxima de burbuja (se mide p_1); (9) Método de burbuja (se mide $p_1 - p_2$; el modo de área constante se expresa con línea continua, y el área variable o modo de burbuja pulsante, entre la línea continua y la línea discontinua); (10) Método de crecimiento de gota; (11) Método de peso o volumen de gota; (12) Método de chorro oscilante (a y c representan secciones transversales que son elipses con sus ejes mayor y menor intercambiados; b y d representan secciones transversales que son círculos, y λ es la longitud de onda); (13) Método de placa inclinada (la tensión se mide con una placa de Wilhelmy). Figura tomada de Franses y col. (1996)

4.2 Métodos por adhesión

Los métodos por adhesión se basan en la medición directa de la fuerza ejercida por una interfaz líquido-sólido sobre un objeto sólido (placa, anillo o varilla) (Ebnesajjad, 2011; Gijsenbergh y Puers, 2018). Para determinar la tensión superficial dinámica, $\sigma(t)$, mediante estos métodos, se debe resolver la ecuación (4.1) y/o la ecuación (4.2). La ecuación (4.1) define en primera instancia la existencia de una línea de contacto, o perímetro mojado, ℓ , una fuerza que no se encuentra en equilibrio, $F(t)$, y un ángulo de contacto dinámico, $\theta(t)$, generados por la tensión superficial,

$$F(t) = \sigma(t)\ell \cos\theta(t) \quad (4.1)$$

y la ecuación (4.2) describe el fenómeno de ascenso capilar, $h(t)$.

$$h(t) = \frac{2\sigma(t)}{\Delta\rho g} (1 - \cos\theta(t))^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

donde $\Delta\rho$ es la densidad y g la aceleración de la gravedad. En el caso que de conocer $\theta(t)$ o que el valor de $\theta(t) = 0$, se puede determinar $\sigma(t)$ por cualquiera de las dos ecuaciones. (Franses y col., 1996).

4.2.1 Anillo de Du Noüy

El anillo de Du Noüy es un método de medición de tensión superficial o interfacial directa, que consta de un anillo de platino, Pt, (o una aleación inerte, como por ejemplo Ir/Pt) de radio R conocido, la cual atraviesa la interfaz y mide la fuerza que ejerce el menisco sobre este. En este método no interviene el término de flotabilidad, pero se toma en cuenta un término de capilaridad debido al menisco formado en la parte inferior del anillo. La fuerza resultante, o necesaria para elevar el anillo de la superficie, es la suma de la fuerza de capilaridad y de la tensión superficial (Gijzenbergh y Puers, 2018), por lo cual, se debe utilizar un factor de corrección basado en las circunferencias del anillo para obtener los valores de tensión superficial o interfacial (Zuidema & Waters, 1941). Para determinar la tensión superficial mediante este método se utiliza la ecuación (4.3).

$$\sigma = \frac{\alpha F}{4\pi R_a \cos\theta} \quad (4.3)$$

donde F es la suma de fuerzas que actúan sobre la microbalanza y R_a el radio del anillo (Gijzenbergh y Puers, 2018).

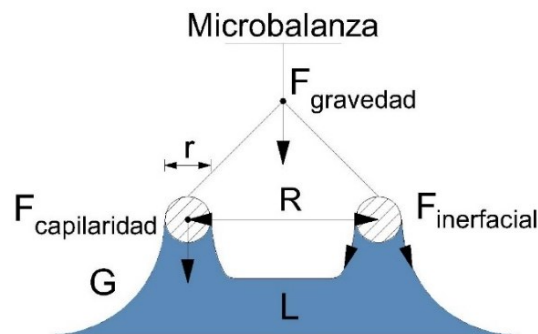


Figura 4.2 Esquema del método del anillo de Du Noüy

4.2.2 Placa de Wilhelmy

Este método consiste en una placa rugosa y delgada de platino, Pt, (o una aleación inerte, como por ejemplo Ir/Pt) colocada en posición vertical y suspendida mediante una microbalanza (o dinamómetro) a través de la interfaz gas-líquido.

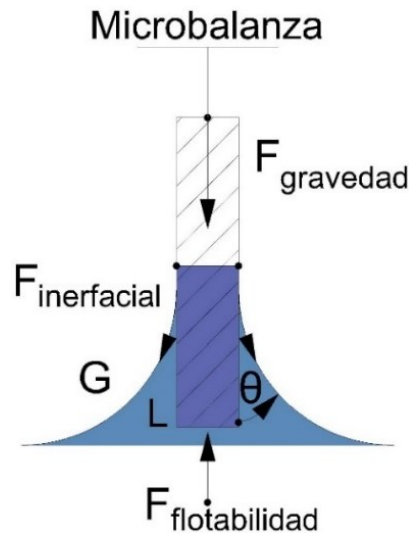


Figura 4.3 Esquema del Plato de Wilhelmy (Gijsenbergh y Puers, 2018)

Al momento de elevar la placa se produce un cambio en el área de la superficie del líquido lo cual se ve reflejado como una fuerza, F , en la microbalanza. Esta fuerza es por consiguiente igual a la suma de fuerzas que actúan sobre la placa, las cuales se muestran en la Figura 4.3. En este método se asume que el líquido moja perfectamente la superficie del sólido, por lo que el ángulo de contacto $\theta = 0^\circ$, y la tensión superficial se determina conforme a la ecuación (4.4),

$$\sigma = \frac{F}{2(w + l)\cos\theta} \quad (4.4)$$

donde l y w son el largo y el ancho de la placa. El método tiene la ventaja que no se requiere de un factor de corrección o parámetros de ajuste. La sensibilidad del método depende del tamaño de la placa (entre mayor sea esta, mayor es la sensibilidad) y la sensibilidad de la microbalanza. (Gijzenbergh y Puers, 2018)

4.3 Métodos de forma y de presión

4.3.1 Presión máxima de burbuja

Este método establece que es posible determinar la tensión superficial mediante la medición de la presión que se requiere para formar una burbuja a partir de un capilar sumergido dentro de un líquido y su presión hidrostática a partir de la ecuación de Young-Laplace. Este método puede ser empleado cuando la longitud capilar, $L_{cap} = (2\sigma/\Delta\rho_l g)$, es menor que las dimensiones de la burbuja y por lo tanto $R_1 = R_2 = R_0$. (Franses y col., 1996). La presión se determina de la siguiente manera:

$$p_{max} = \frac{2\sigma}{R_0} + \rho_l g h + \Delta p_c \quad (4.5)$$

Donde p_{max} es la presión del gas máxima medida y Δp_c es una corrección atribuida a efectos hidrodinámicos (resistencia aerodinámica al paso del aire en el capilar y resistencia hidrodinámica del líquido al movimiento de la burbuja). Mientras el gas permanezca dentro del capilar, los radios de curvatura no son equivalentes. A medida que se sigue bombeando aire, la presión del gas va en aumento hasta llegar a un punto máximo y consecuentemente la forma de la burbuja se vuelve semiesférica. Si se sigue suministrando aún más aire la presión del gas disminuye y aumenta el volumen de la burbuja hasta su desprendimiento (Fainerman, Makievski, & Miller, 1993)

4.3.2 Gota pendiente

Este método se puede aplicar en interfases líquido/gas o líquido/líquido. El método consiste en hacer crecer una gota desde la punta de un capilar en posición vertical con un radio r_0 y una velocidad, u , igual al flujo dividido por πr_0^2 .

El uso del número de Bond en esta técnica se utiliza como parámetro, debido a que este “relaciona las fuerzas de empuje y capilaridad y es la razón de la longitud característica de una superficie caliente entre el parámetro del diámetro de una burbuja” (Definición tomada del diccionario de la Real Academia de Ingeniería). Para números de Bond pequeños ($\ll 1$), $B_o = \Delta\rho g r_0^2 / \sigma$, y número capilar pequeño, $Ca = \mu u / \sigma$, donde μ es la viscosidad, la forma de la gota es prácticamente esférica por lo que puede aplicarse la ecuación de Young-Laplace conforme a sus radios de curvatura (Franses y col., 1996).

Este método al igual que el de burbuja ascendente se basan en el hecho que son figuras con simetría axial y por lo tanto el análisis mediante el cual se determina la tensión superficial se puede llevar a cabo a partir de los mismos parámetros (por ejemplo, el análisis del perfil o forma, la medición del ángulo de contacto, relación de diámetros, entre otros) (Neumann, David, y Zuo, 2011).

Capítulo 5

Método de burbuja ascendente desde un capilar sumergido

Las burbujas están clasificadas como formas de simetría axial. Los factores que se suelen estudiar a partir de ellas son el volumen, el área superficial, el área proyectada y el perímetro proyectado. Dado que, las burbujas son figuras de simetría axial, el área proyectada y el perímetro proyectado se toman en paralelo al eje de simetría (Clift, Grace, y Weber, 1978, p. 17,18).

Mediante este método se busca determinar el cambio de forma durante el crecimiento o tiempo de envejecimiento de burbuja y su relación con los parámetros dinámicos o fuerzas que actúan sobre la burbuja durante un estado cuasi-estático. Esta metodología fue propuesta por el doctor Francisco Javier Garfias y Ayala con el fin de solucionar el problema de saturación de fases y obtener valores de tensión superficial dinámica en el sistema decanol/agua y valores de tensión superficial relacionados con la difusión del aire en agua (Sobol, Garfias, y Keller, 1976).

Debido a la importancia que tiene el proceso de formación, crecimiento y la separación de la burbuja de una superficie sólida, se han desarrollado diferentes experimentos y estudios numéricos para describir las diferentes fases y características de las burbujas en diferentes ambientes, variando la temperatura del líquido, la fuerza gravitatoria, los campos eléctricos que actúan sobre la burbuja y la velocidad del flujo del aire. Algunos de los aspectos más importantes, relacionados con la formación y crecimiento de burbujas, son el diámetro del orificio del capilar, el flujo de gas y su relación con la frecuencia en la formación de burbujas, y el volumen de las burbujas, donde en el último aspecto existen diferentes enfoques dependiendo del autor (Gerlach, Biswas, Durst, y Kolobaric, 2005; Vafaei y Wen, 2010a).

Un modelo utilizado para describir el comportamiento dinámico de las burbujas es la forma integral de la ecuación de momentum en un volumen de control que rodea una burbuja:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho_g u dV = & \int_V \rho_g g dV + \int_S [T_l - p_l \mathbf{I} + \rho_l u_l \cdot (u_l - u_s)] \cdot \mathbf{n} dS \\ & + \int_{S+A} [T_g - p_g \mathbf{I} + \rho_g u_g \cdot (u_g - u_s)] \cdot \mathbf{n} dS + \int_{CL} \sigma_{lg} \mathbf{t}_{lg} dL \end{aligned} \quad (5.1)$$

donde V es el volumen de la burbuja, \mathbf{n} y \mathbf{t} son los vectores de unidad normal exterior y tangente respectivamente, p es la presión, u es la velocidad, g es la aceleración de la gravedad, \mathbf{T} es el tensor de esfuerzo viscoso y σ_{lg} es la tensión superficial. Los sufijos g y l se refieren a la fase gaseosa y líquida respectivamente (S. Di Bari, Lakehal, y Robinson, 2013).

Un caso particular de crecimiento de burbuja es el denominado cuasi-estático, donde a diferencia de la ecuación (5.1), solamente se requiere del balance de fuerzas existentes entre la tensión superficial y las fuerzas externas que actúan sobre la burbuja, como la presión y las fuerzas gravitacionales. Esto es debido a que el impulso asociado con el movimiento del centro de gravedad es insignificante en comparación con la magnitud de las fuerzas que actúan sobre ella, por lo que las fuerzas dinámicas asociadas con el movimiento del líquido y del gas son también insignificamente pequeñas (S. Di Bari y col., 2013). Esto quiere decir que el efecto del esfuerzo cortante gas-líquido es despreciable (Vafaei y Wen, 2010a). Los estudios basados en el crecimiento de burbuja cuasi-estático consideran un estado ideal, los cuales se basan en el hecho que la burbuja se encuentra adherida al borde de un orificio sólido suave y homogéneo, donde no existe histéresis en el ángulo de contacto y el grado de mojabilidad es alto (Gerlach y col., 2005). Para lograr el estado cuasi-estático el flujo de aire inyectado en la burbuja es muy pequeño, pudiendo llevarse a cabo el estudio con flujos de

2 mL/h (Sergio Di Bari y Robinson, 2013), 100mL/h (S. Di Bari y col., 2013), 120 mL/h (Vafaei y Wen, 2010b), 600mL/h (Gharedaghi, Dousti, Eshraghi, Hanafizadeh, y Ashjaee, 2017), etc. Este método es utilizado para determinar la tensión superficial e interfacial al suponer que la interfaz fluido-gas es estáticas y por lo tanto se encuentran en equilibrio con respecto a los gradientes de presión hidrostática y los incrementos en el estrés normal debido a la tensión superficial en la interfase curva de la burbuja (Clift y col., 1978, p. 22).

Autores como Sergio di Bari y Robinson (2013), Gerlach y col. (2005), Lesage y Marois (2013), Sattari y Hanafizadeh (2018) y Vafaei y Wen (2010b), entre otros, han utilizado la ecuación de Young-Laplace para predecir la forma de las burbujas cuasi-estáticas dado que esta ecuación muestra una relación entre la presión diferencial, Δp , y el producto de la tensión superficial, σ_{lg} , con los radios de curvaturas de la burbuja en la interfase,

$$\Delta p = \sigma_{lg} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] \quad (5.2)$$

y esta puede ser combinada con el balance de fuerzas que actúan sobre la burbuja. Esto le confiere a la ecuación (5.2) la capacidad de predecir la forma de figura con simetría axial, tales como gotas pendientes y burbujas (Sergio Di Bari y Robinson, 2013; Gerlach y col., 2005).

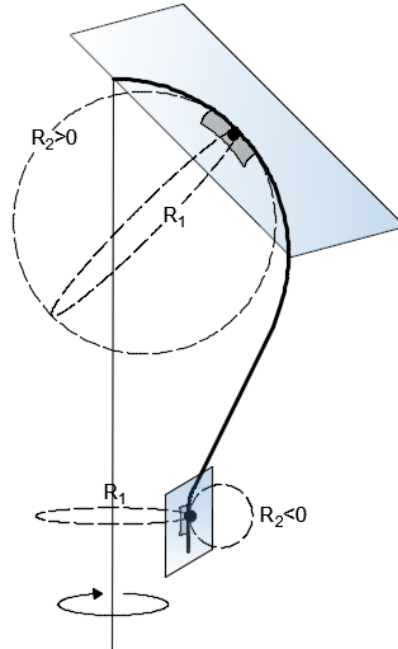


Figura 5.1 Radios de curvatura en dos puntos diferentes a lo largo de la curva (Lesage y Marois, 2013)

Al efectuar un acercamiento a la superficie diferencial de la Figura 5.1, se observa:

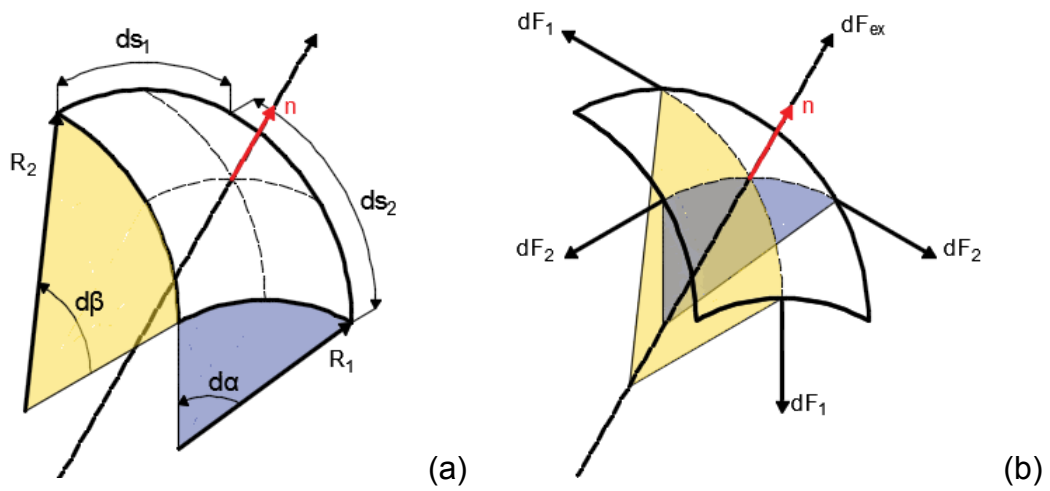


Figura 5.2 (a) Radios de curvatura, R_1 y R_2 , (b) Fuerzas que actúan sobre una superficie diferencial

Donde R_1 es el radio de curvatura que describe la latitud a medida que gira y R_2 es el radio de curvatura en una sección vertical de la burbuja que describe la longitud a medida que gira. El centro de R_1 y R_2 está sobre la misma línea pero en diferentes ubicaciones, como se muestra en la Figura 5.2 (Vafaei y Wen, 2010a).

Los componentes de la ecuación (5.2) pueden ser escritos de la siguiente manera (ver Figura 5.4):

$$p_g(z) = \frac{2\sigma_{lg}}{R_0} + p_0 + \rho_g gz + \rho_l gh \quad (5.3)$$

$$p_l(z) = p_0 + \rho_l g(h + z) \quad (5.4)$$

$$R_1 = \frac{ds}{d\theta} \quad (5.5)$$

$$R_2 = \frac{r}{\text{sen}\theta} \quad (5.6)$$

Los términos p_g y p_l son la presión ejercida por el gas y el líquido respectivamente, σ_{lg} es la tensión superficial, p_0 es la presión atmosférica, R_0 es el radio equivalente, h es la cabeza hidrostática, ds es la sección diferencial de superficie sobre la curva, θ es el ángulo en el punto (x,z), ρ_g y ρ_l son la densidad del gas y del líquido respectivamente y g es la aceleración de la gravedad. La ecuación de Young-Laplace puede ser resuelta mediante el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias para interfases con simetría axial:

$$\frac{dr}{ds} = \cos\theta \quad (5.7)$$

$$\frac{dz}{ds} = \text{sen}\theta \quad (5.8)$$

$$\frac{dV}{ds} = \pi r^2 \text{sen}\theta \quad (5.9)$$

Mediante este sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias se evita el problema de la singularidad en el vértice de la burbuja, ya que:

$$\frac{\text{sen}\theta}{r}_{s=0} = \frac{1}{R_0} \quad (5.10)$$

donde R_0 se considera un radio equivalente, que se define como:

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (5.11)$$

Otra ventaja de este sistema de ecuaciones es que únicamente es necesario conocer dos parámetros de la forma de la burbuja (ángulo de contacto, radio de la línea de contacto, volumen de la burbuja o ubicación del vértice) y las condiciones a la frontera $r(0) = z(0) = \theta(0) = V(0) = 0$ para ser resuelto (Vafaei, Angeli, y Wen, 2011). Al conjunto de las ecuaciones diferenciales anteriores se le puede añadir las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{2}{R_0} + \frac{\Delta\rho g}{\sigma} z - \frac{\text{sen}\theta}{r} \quad (5.12)$$

$$\frac{da}{ds} = 2\pi x \quad (5.13)$$

Siendo a el área y la condición a la frontera $a(0) = 0$. Este nuevo conjunto de ecuaciones es una solución numérica para interfases con simetría axial líquido-fluido o ALFI (Axisymmetric Liquid-Fluid Interfases), la cual está basada en la Ecuación de Capilaridad de Laplace donde se busca mediante un mínimo de información y a partir del procesamiento de imágenes de gotas o de burbujas resolver el sistema de ecuaciones. A partir de este razonamiento se desprenden los métodos de análisis de forma de gotas con simetría axial o ADSA (Axisymmetric

Drop Shape Analysis), tales como ADSA-D (a partir del diámetro máximo), ADSA-P (a partir de las coordenadas del perfil), ADSA-CP (a partir del diámetro de contacto), ADSA-HD (a partir de la altura y el diámetro) (Del Río y Neumann, 1997), ADSA-IP (análisis de forma de gotas con perfiles imperfectos) (David, Ninomiya, Winklbauer, y Neumann, 2009; Kalantarian y col., 2009; Kwok, Vollhardt, Miller, Li, y Neumann, 1994; Saad y Neumann, 2014). Las principales limitaciones de estos análisis es que por debajo de la forma crítica (cuando la forma se asemeja a una esfera), a bajos valores del número de Bond o a tensiones superficiales ultrabajas, las ecuaciones no convergen (Del Río y Neumann, 1997; Gunde, Kumar, Lehnert-Batar, Mäder, y Windhab, 2001), por lo cual Gunde y col., 2001 proponen el número de Wothington como medida de precisión. Existe otro método parecido a las ADSA llamado TIFA (Theoretical Image Fitting Analysis) el cual determina la forma sin utilizar la detección de contorno, aunque la precisión es menor que con los ADSA cerca de la forma esférica (Saad y Neumann, 2014).

Las ventajas de este tipo de experimentación y análisis es que solo se requiere poco material y suele tener una alta sensibilidad (Miller, Sedev, Schano, Ng, y Neumann, 1993).

5.1 Modelos de análisis de burbuja ascendente

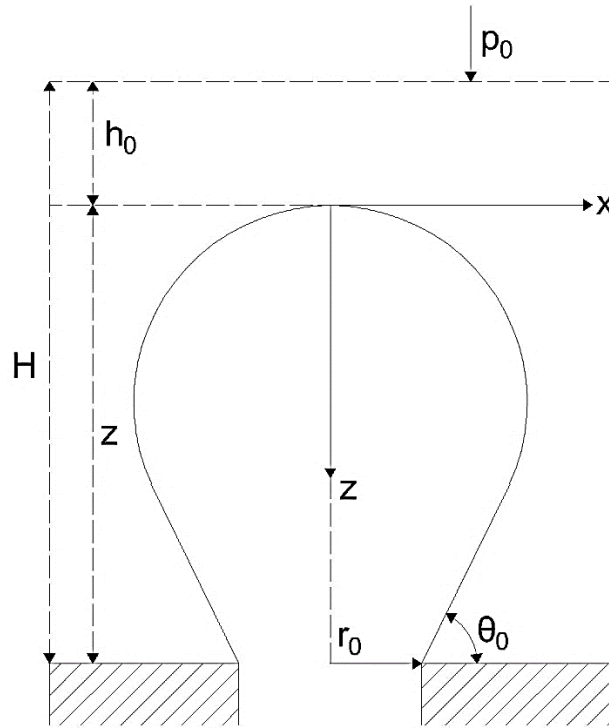


Figura 5.3 Diagrama de una burbuja en un sistema coordenado

5.1.1 Modelos basados en un balance de fuerza

El primer modelo aplica un balance de fuerzas sobre un área diferencial:

$$\sum F_z = -dF_b(z) - F_p(z + dz) + F_p(z) - F_\sigma(z)\sin\theta + F_\sigma(z + dz)\sin(\theta + d\theta) = 0 \quad (5.14)$$

Donde F_b es la fuerza de flotabilidad, F_p es la fuerza debida a la presión, F_σ es la fuerza debida a la tensión superficial. La ecuación se puede entonces reescribir como:

$$dF_b(z) + d[F_p(z) - F_\sigma(z)\sin\theta] = 0 \quad (5.15)$$

La fuerza de flotación, F_b , se puede expresar como:

$$dF_b(z) = (\rho_l - \rho_g)g\pi r^2 dz \quad (5.16)$$

y la fuerza debida a la presión hidrostática, F_p , como:

$$F_p(z) = \Delta p(z)\pi r^2 \quad (5.17)$$

donde Δp es la diferencia entre la presión del gas, $p_g(z)$, y la fase líquida, $p_l(z)$. La presión del líquido y el gas como función de z están dadas por:

$$p_g(z) = \frac{2\sigma_{lg}}{R_o} + \rho_g g z + p_0 \quad (5.18)$$

$$p_l(z) = \rho_l g z + p_0 \quad (5.19)$$

siendo σ_{lg} la tensión superficial en la interfase líquido – gas, $\left(\frac{2\sigma_{lg}}{R_o}\right)$ la diferencia de presión en el ápice de la burbuja y R_o el radio de curvatura en la parte superior del ápice. $\rho_g g z$ es la presión hidrostática del gas y $\rho_l g z$ la presión hidrostática del líquido y p_0 la presión en el ápice debido a la presión hidrostática. Si se considera que $\Delta p(z) = p_g(z) - p_l(z)$, y se sustituyen en ella las ecuaciones (5.18) y (5.19), se obtiene entonces:

$$\Delta p(z) = \frac{2\sigma_{lg}}{R_o} - (\rho_l - \rho_g) g z \quad (5.20)$$

Es de hacerse notar que p_0 no afecta la diferencia de presiones en la interfase. Sustituyendo la ecuación (5.20) en la ecuación (5.17):

$$F_p(z) = \left(\frac{2\sigma_{lg}}{R_o} - (\rho_l - \rho_g) g z \right) \pi r^2 \quad (5.21)$$

la fuerza debida a la tensión superficial es:

$$F_{\sigma}(z) = 2\pi r \sigma_{lg} \quad (5.22)$$

substituyendo las ecuaciones de presión del gas (5.3) y del líquido (5.4) en las ecuaciones de balance de fuerzas se obtiene:

$$(\rho_l - \rho_g)g\pi r^2 dz - d\left[\left(\frac{2\sigma_{lg}}{R_0} - (\rho_l - \rho_g)gz\right)\pi r^2 - 2\sigma_{lg}r\pi \text{sen}\theta\right] = 0 \quad (5.23)$$

La ecuación (5.23) puede reescribirse como:

$$\begin{aligned} (\rho_l - \rho_g)gr^2 + \frac{4\sigma_{lg}}{R_0}r \frac{dr}{dz} - g(\rho_l - \rho_g)gz\left(r^2 + 2rz \frac{dr}{dz}\right) \\ - 2\sigma_{lg}\left(\frac{dr}{dz}\text{sen}\theta + r \frac{d\text{sen}\theta}{d\theta} \frac{d\theta}{ds} \frac{ds}{dz}\right) = 0 \end{aligned} \quad (5.24)$$

que al integrarla entre los límites "0" y " z_m " y tomando en cuenta que $z_m = r_m$ (ver Figura 5.4), la solución a la ecuación (5.24) es:

$$(\rho_l - \rho_g)gV_m + \frac{2\sigma_{lg}}{R_0}\pi r_m^2 - (\rho_l - \rho_g)gz_m\pi r_m^2 - 2r_m\pi\sigma_{lg}\text{sen}\theta = 0 \quad (5.25)$$

La ecuación (5.25) es una expresión analítica de los parámetros de una burbuja a condiciones de bajo flujo de gas. También muestra que existen varias fuerzas que actúan sobre la burbuja, como son la fuerza de flotación, $(\rho_l - \rho_g)gV$, la fuerza debida a la presión de Laplace, $\left(\frac{2\sigma_{lg}}{R_0}\pi r^2\right)$, la fuerza hidrostática $(\rho_l - \rho_g)gz\pi r^2$, y un componente de fuerza vertical debida a la tensión superficial, $(2\sigma_{lg}r\pi \text{sen}\theta)$ (Gharedaghi y col., 2017; Sattari y Hanafizadeh, 2019; Vafaei y col., 2011; Vafaei, Borca-Tasciuc, y Wen, 2010, 2014; Vafaei y Wen, 2010a, 2010b, 2015).

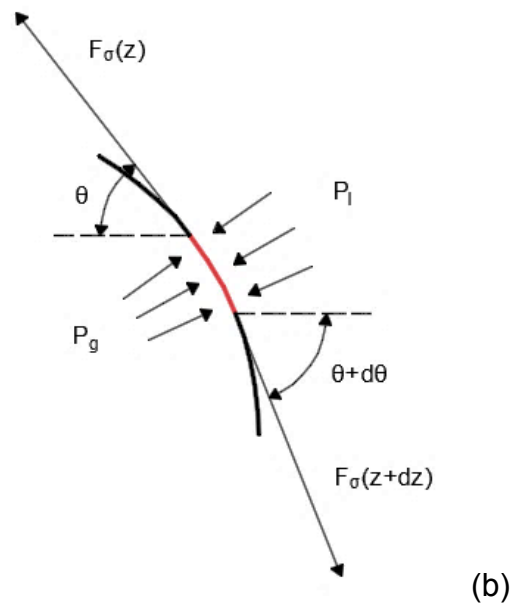
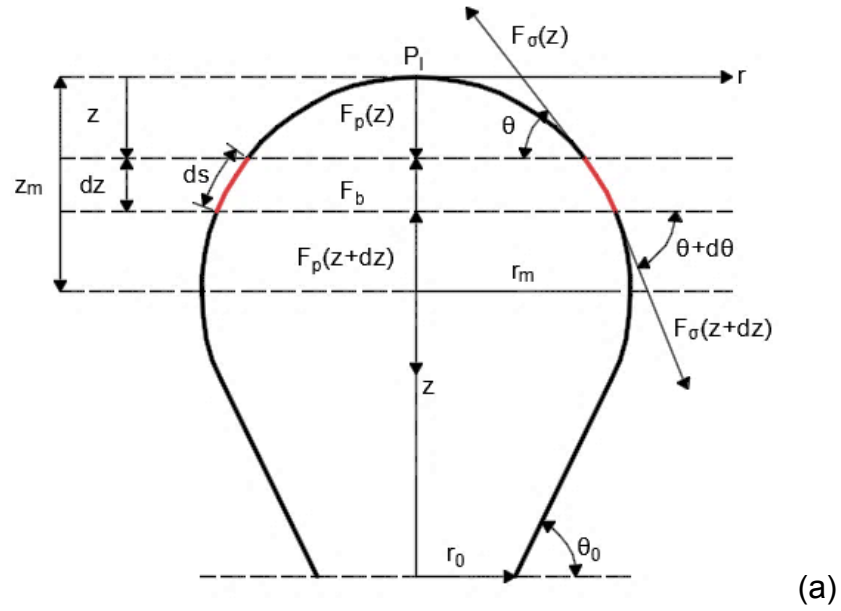


Figura 5.4 Esquemática (a) y (b) de las fuerzas efectivas sobre un segmento diferencial de burbuja simétrica a lo largo del eje vertical (Vafaei y Wen, 2015)

Estudios similares efectuaron un balance de fuerzas pero de manera global (S. Di Bari y col., 2013; Sergio Di Bari y Robinson, 2013).

$$\sum F = F_b + F_p + F_\sigma \quad (5.26)$$

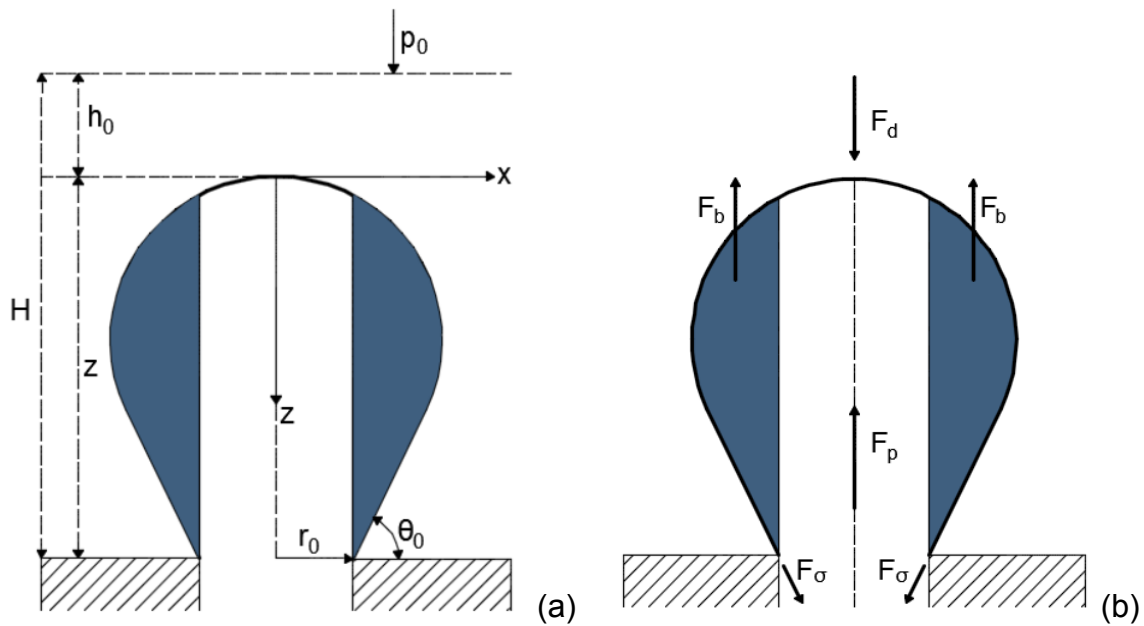


Figura 5.5 (a) Crecimiento de una burbuja a partir de un capilar sumergido. (b) Fuerzas que actúan sobre la burbuja, F_b es la fuerza de flotabilidad, F_p es la fuerza debido a la presión, F_σ es la fuerza de capilaridad y F_d es la fuerza dinámica (S. Di Bari y col., 2013)

Los términos de la ecuación (5.26) pueden escribirse como:

$$F_b = (\rho_l - \rho_g)gV_B \approx \rho_l gV_B \quad (5.27)$$

$$F_p = \pi r_0^2 (p_g - p_l) \quad (5.28)$$

$$F_\sigma = 2\pi r_0 \sigma_{lg} \sin\theta \quad (5.29)$$

Este modelo, tal y como se muestra en la Figura 5.5, solo considera el segmento vertical de la burbuja que se encuentra expuesta al líquido en su superficie superior e inferior, por lo que la fuerza de flotación, F_b , planteada en el modelo se denomina fuerza de flotación parcial. En otro estudio realizado por Sergio Di Bari y Robinson (2013) se incluye un término denominado F_N , el cual agrupa fuerzas verticales dinámicas, F_D , y fuerzas eléctricas inducidas, F_E , siendo el balance de fuerzas total:

$$\sum F = F_b + F_p + F_\sigma + F_N \quad (5.30)$$

Para el caso de los estudios llevados a cabo por Sergio Di Bari & Robinson (2013) la presión del gas dentro de la burbuja es conocida y se describe como:

$$p_g = \Delta p_m + p_{atm} \quad (5.31)$$

donde Δp_m es la diferencia de presión medida y p_{atm} la presión atmosférica. Con respecto a la presión local del líquido, a una distancia vertical a partir del ápice, esta se expresa como:

$$p_l = p_{atm} + \rho_l g(H - h_0) + \rho_l g z + p_{ld} + p_{le} \quad (5.32)$$

donde p_{le} y p_{ld} son los componentes presión eléctrica (debido a la presencia de un campo eléctrico) y dinámica del líquido respectivamente. Sustituyendo la ecuación (5.39) y (5.35) en la ecuación de Young-Laplace (ver ecuación (5.2)) se obtiene:

$$p_{ld} + p_{le} = \Delta p_m - p_{ls} - \sigma_{gl} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (5.33)$$

Siendo p_{ls} un término que agrupa los términos hidrostáticos. Los autores afirman que para flujos de aire lo suficientemente pequeños el término dinámico es insignificante en comparación con los otros términos siendo así el crecimiento de la burbuja cuasi-estático y por lo tanto es posible estimar la contribución de la presión eléctrica sobre la superficie de la burbuja.

5.1.2 Modelo basado en un balance de presiones sobre la interfase

En este método, Gerlach y col. (2005) efectúan un balance basado en la presión ejercida por las diferentes fuerzas que actúan sobre la burbuja (ver Figura 5.3):

$$p_g = p_\sigma + p_0 + p_h \quad (5.34)$$

Al reescribir p_σ y p_h ,

$$p_\sigma = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \sigma_{lg} \quad (5.35)$$

$$p_h = \rho_l g (h_0 + z) \quad (5.36)$$

y substituyendo las ecuaciones (5.35) y (5.36) en la ecuación (5.34) se obtiene:

$$p_g = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \sigma_{lg} + p_0 + \rho_l g (h_0 + z) \quad (5.37)$$

Si se evalúa la ecuación en el ápice de la burbuja, los radios de curvatura en este punto son iguales ($R_1 = R_2 = R_0$). Por lo tanto,

$$p_g = \frac{2\sigma_{lg}}{R_0} + p_0 + \rho_l g h_0 + \rho_l g z \quad (5.38)$$

Gerlach y col. (2005) expresan en su estudio a la presión ejercida por el gas, p_g , dentro de la burbuja como:

$$p_g = p_{g,0} + \rho_g g z \quad (5.39)$$

donde $p_{g,0}$ es la presión del gas en el ápice de la burbuja, como se describe en la siguiente ecuación:

$$p_{g,0} = \frac{2\sigma_{lg}}{R_0} + p_0 + \rho_l g h_0 \quad (5.40)$$

y la presión ejercida por el gas a la altura del orificio (o base de la burbuja) se expresa como:

$$p_{g,s} = \frac{2\sigma_{lg}}{R_0} + p_0 + \rho_l g H - (\rho_l - \rho_g) g z \quad (5.41)$$

Al sustituir la ecuación (5.40) en la ecuación (5.39):

$$p_g = \frac{2\sigma_{lg}}{R_0} + p_0 + \rho_l g h_0 + \rho_g g z \quad (5.42)$$

e igualar las ecuaciones (5.37) y (5.42), se obtiene:

$$\frac{2}{R_0} - \frac{(\rho_l - \rho_g)g}{\sigma_{lg}} \cdot z = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (5.43)$$

Aplicando una relación entre los radios de curvatura y el sistema coordenado estos se expresan como:

$$R_1 = \frac{(1 + z_x^2)^{\frac{3}{2}}}{z_{xx}}, \quad R_2 = \frac{x(1 + z_x^2)^{\frac{1}{2}}}{z_x} \quad (5.44)$$

Substituyendo la ecuación (5.44) en la ecuación (5.43) y dividiendo entre la tensión superficial, σ_{lg} , se obtiene:

$$\frac{2}{R_0} - \frac{(\rho_l - \rho_g)g}{\sigma_{lg}} \cdot z = \left(\frac{z_{xx}}{(1 + z_x^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{z_x}{x(1 + z_x^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (5.45)$$

Donde $\frac{(\rho_l - \rho_g)g}{\sigma_{lg}} = \frac{1}{L_{cap}^2}$, constante de Laplace o Longitud Capilar. Al normalizar la ecuación (5.45) respecto a L_{cap} se obtiene:

$$\frac{2}{R_0^*} - Z^* = \left(\frac{Z_{xx}^*}{(1 + Z_x^{*2})^{\frac{3}{2}}} + \frac{Z_x^*}{X^*(1 + Z_x^{*2})^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (5.46)$$

Para el caso donde las burbujas sean lo suficientemente pequeñas como para que la acción de la gravedad sea despreciable, la aproximación se asume que es buena cuando el factor β cumple lo siguiente:

$$\beta = \frac{(\rho_l - \rho_g)gR_0}{\sigma_{lg}} \leq 0.1 \quad (5.47)$$

5.1.3 Modelo basado en el número de Bond

Lesage y Marois (2013) proponen una solución alternativa para la predicción de la forma de la burbuja que se basa igualmente en la ecuación de Young-Laplace y un estado cuasi-estático, con la diferencia que su modelo matemático se basa en el número de Bond, B_0 . Este modelo redefine p_l y p_g tal y como se muestra en las ecuaciones (5.3) y (5.4), y que al reordenar la ecuación (5.2) de Young-Laplace se obtiene:

$$(\rho_g - \rho_l)gz = \frac{2\sigma_{lg}}{R_0} - \sigma_{lg} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (5.48)$$

Al normalizar las longitudes de la ecuación (5.48) mediante el radio del orificio de salida, r_0 , y dividir todos los términos entre la tensión superficial, σ_{lg} , se obtiene la ecuación de Capilaridad en términos adimensionales, para obtener:

$$B_0 \cdot Z^{**} = \frac{2}{R_0^{**}} - \left(\frac{Z_{xx}^{**}}{(1 + Z_x^{**2})^{\frac{3}{2}}} + \frac{Z_x^{**}}{X^{**} (1 + Z_x^{**2})^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (5.49)$$

El número de Bond, B_0 , (ver Capítulo 4.3.2) es entonces una relación de la Longitud Capilar, $L_{cap} = \left(\frac{\sigma}{\Delta\rho g}\right)^{\frac{1}{2}}$, y el radio del orificio, r_0 , tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$B_0 = \left(\frac{r_0}{L_{cap}}\right)^2 \quad (5.50)$$

Se observa que la ecuación (5.49) depende completamente del número de Bond y, por lo tanto, si se trabaja a diferentes condiciones, pero la relación entre el radio del orificio y la longitud capilar son iguales, el perfil de la burbuja normalizada será el mismo.

5.1.4 Método de relación de diámetros

Se basa en el método de gota pendiente desarrollado por Andreas, Hauser, y Tucker (1937), donde se busca determinar la tensión superficial mediante la relación que existe entre los diámetros de la gota mostrados en la Figura 5.6.

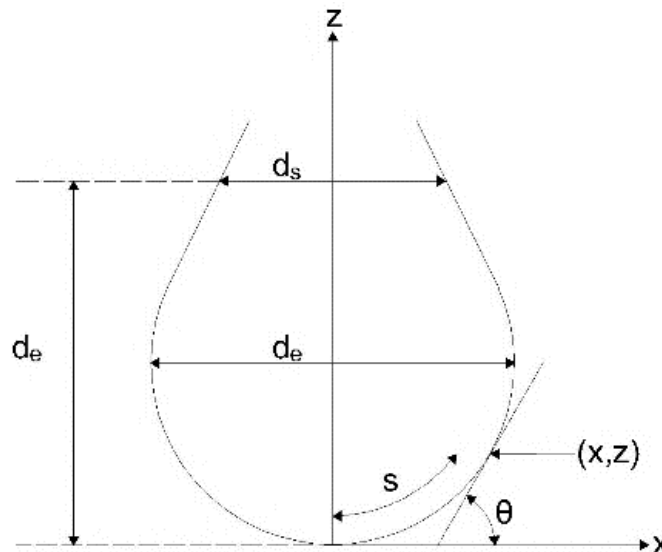


Figura 5.6 Diagrama de gota pendiente (Fordham, 1948)

La ecuación de segundo orden que describe a la gota es la siguiente:

$$z_{xx} + \frac{z_x}{x} [1 + (z_x)^2] = \left[\frac{2}{R_0} - \frac{g\Delta\rho z}{\sigma_{lg}} \right] [1 + (z_{xx})^2]^{\frac{3}{2}} \quad (5.51)$$

Esta ecuación se normaliza mediante el radio de curvatura en el origen (ápice de la gota o burbuja) o radio equivalente, R_0 , el cual se toma como unidad de longitud dando como resultado:

$$Z_{xx} + \frac{Z_x}{X} [1 + (Z_x)^2] = [2 - \beta Z] [1 + (Z_{xx})^2]^{\frac{3}{2}} \quad (5.52)$$

donde

$$\beta = \frac{g\Delta\rho R_0^2}{\sigma_{lg}} \quad (5.53)$$

Andreas y col. (1937) y Fordham (1948) resuelven la ecuación y describen la forma de la gota mediante una relación de radios, S , entre el diámetro del ecuador d_e y un segundo diámetro, d_s , el cual se encuentra a una distancia igual al diámetro del ecuador a partir de la base de la gota.

$$S = \frac{d_s}{d_e} \quad (5.54)$$

Por último, se define al parámetro, H , como una relación entre el diámetro en el ecuador y el radio de curvatura en el origen o equivalente,

$$\mathbf{H} = \beta \left(\frac{d_e}{R_0} \right)^2 \quad (5.55)$$

Despejando de la ecuación (5.53) la tensión superficial y combinándola con la ecuación (5.55) se obtiene:

$$\sigma_{lg} = \frac{g\Delta\rho}{\mathbf{H}} (d_e)^2 \quad (5.56)$$

Por otra parte, Roe, Bacchetta, y Wong (1967), elaboraron un estudio numérico donde se varía la altura, Z_n , a la cual se mide el diámetro d_n . Siendo así,

$$Z_n = \left(\frac{n}{10} \right) d_e \quad (n = 8, \dots, 12) \quad (5.57)$$

donde se determinó que se mejora la precisión de las mediciones a alturas mayores a Z_{10} .

Por su parte, Sobol y col. (1976) adaptaron estos modelos al crecimiento de burbuja desde un capilar sumergido, donde la ecuación que utilizaron fue:

$$\sigma_{lg} = \frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\mathbf{H}} (d_e)^2 \quad (5.58)$$

ubicando d_n a una altura de Z_8 .

Capítulo 6

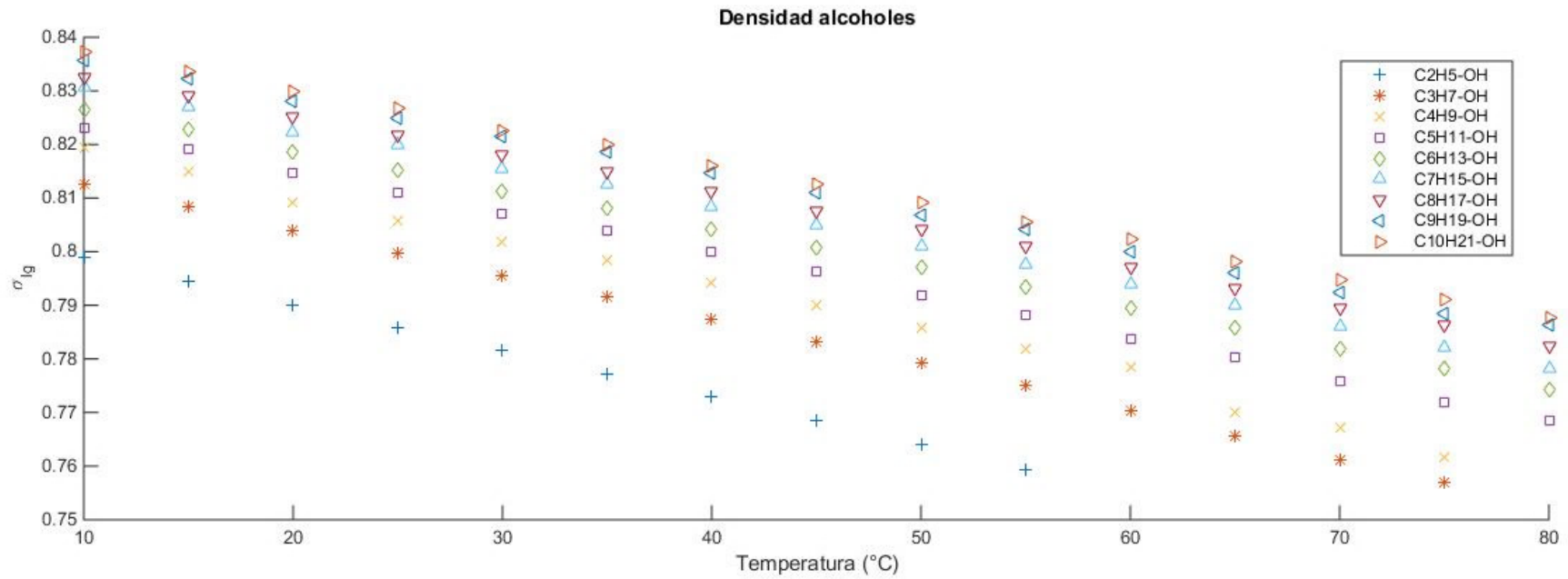
Propiedades del agua, alcoholes y soluciones electrolíticas

6.1 Agua

La molécula de agua posee una estructura de forma tetraédrica con el átomo de oxígeno en el centro, dos pares de átomos de hidrógeno en dos de sus vértices y dos pares de electrones desapareados en los vértices restantes pudiendo formar así hasta cuatro enlaces tipo puente de hidrógeno. Esta estructura y la capacidad de formar múltiples enlaces le permite a la molécula del agua estar en estado líquido a temperatura ambiente y formar una red tridimensional lo cual se refleja en su alta tensión superficial (Stillinger, 1980)

6.2 Alcoholes

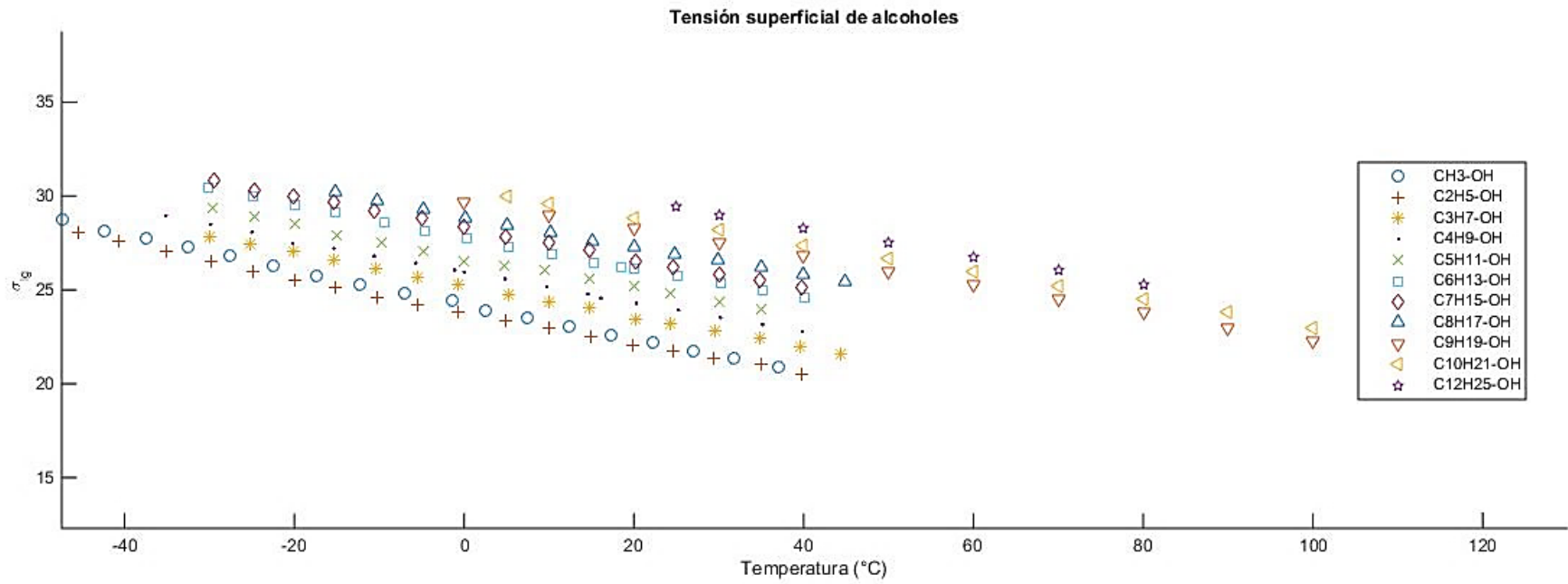
Los alcoholes son compuestos de fórmula general R-OH, el OH es el grupo hidroxilo donde el oxígeno contiene orbitales híbridos del tipo sp^3 , R representa cualquier grupo alquilo incluso sustituido. El grupo alquilo puede ser primario, secundario o terciario, de cadena abierta o cíclica y puede o no contener un doble enlace, un átomo de halógeno (-X), un anillo aromático o grupos hidroxilo (-OH) adicionales (Morrison y Boyd, 1998, p. 622). El hidroxilo es el grupo funcional que determina las propiedades y características en la familia de los alcoholes, y las variaciones en la estructura y tamaño del grupo R modifica las características físicas y químicas dentro de la misma familia tales como la densidad, el punto de fusión, punto de ebullición, viscosidad, tensión superficial, momento dipolar, solubilidad en líquidos polares, presión de vapor, velocidad de reacción, tipo de reacción, entre otras. Este cambio en las propiedades de los alcoholes, debido al grupo R, corresponde al área de contacto entre las moléculas, debido al número de carbonos y su geometría, donde el área y consecuentemente las interacciones intermoleculares es mayor en alcoholes cíclicos, posteriormente en alcoholes lineales y por último alcoholes ramificados, debido a su “esfericidad” tal y como se muestra en la Gráfica 6.1.



Gráfica 6.1 Densidad de alcoholes lineales (1-alcoholes) a diferentes temperaturas (Cano Gómez, 2013; Saleh, Akhtar, Begum, Ahmed, y Begum, 2004)

Los alcoholes contienen un grupo lipofílico y un grupo hidroxilo, similar al del agua, lo cual le confiere, en contraste con sus hidrocarburos homólogos, un punto de ebullición mayor y una mayor capacidad de solubilizarse en el agua. En los hidrocarburos lineales solo existen fuerzas de corto alcance (fuerza de Van der Waals, dipolo-dipolo, ...), mientras que los alcoholes, al contener un grupo –OH, el cual es muy polar, pueden establecer puentes de hidrógeno e interacciones del tipo Van der Waals. Los alcoholes de cadena corta son miscibles en agua (hasta el carbono tres), pero a partir del carbono cuatro la solubilidad con el agua comienza a disminuir considerablemente. Por otra parte, las propiedades químicas de los alcoholes se basan en que pueden comportarse como ácidos o bases, debido al efecto inductivo mediante el cual se establece un momento dipolar (Morrison y Boyd, 1998, pp. 624–626; Zeppieri y López de Ramos, 2009).

Con respecto a la tensión superficial de los alcoholes lineales, en la Gráfica 6.2 se muestra como esta aumenta conforme incrementa el peso molecular y el área de interacción intermolecular. Por ejemplo, la tensión superficial del 1-Propanol a 20°C es de 22.73 mN/m mientras que el del 1-Butanol y el 1-Pentanol a la misma temperatura es de 24.16 mN/m y 25.69 mN/m respectivamente, mientras que la tensión superficial del 2-Propanol, el 2-Butanol y 2-Pentanol a la misma temperatura es de 21.30 mN/m, 23.18 mN/m y 23.70 mN/m respectivamente (Azizian, Bashavard, y Yahyaei, 2006).



Gráfica 6.2 Variación de la tensión superficial conforme a la temperatura y el número de carbonos de alcoholes lineales (Wohlfarth y Wohlfarth, 1997)

6.3 Soluciones electrolíticas

El estudio de soluciones de electrolitos, mediante la observación de los cambios en la tensión superficial, es fuente de información sobre la interacción de los iones con la interfaz aire-agua (Slavchov y Novev, 2012), así como el efecto de hidratación (Yuan, Zhan, Yi, Zhao, y Song, 2018). Usualmente, se ha buscado una explicación de la propensión a la superficie iónica en la interfaz aire-agua a partir de las propiedades de los iones tales como el tamaño, la carga, la polarización y la anisotropía de la forma de la gota o burbuja, y/o al considerar varias fuerzas impulsoras potenciales como la energía libre de hidratación, fuerzas de dispersión, fuerzas de cavitación, solvatación anisotrópica, el volumen parcial molar, entre otras (Boström, Williams, y Ninham, 2001; Slavchov y Novev, 2012; Verreault y Allen, 2013). Con base a lo anterior, se han elaborado estudios para poder determinar el efecto que cada ion produce en la tensión superficial, ya sea a partir de sales (Hailong Chen, Li, Wang, Wang, y Zhihan, 2017; Leroy, Lassin, Azaroual, y André, 2010; Okur, Chen, Wilkins, y Roke, 2017; Verreault y Allen, 2013; Yuan y col., 2018) o comparando los efectos causados por sales, ácidos y bases (Manciu, Manciu, y Ruckenstein, 2017). Esto ha permitido construir tablas (ver Tabla 6.1) de incrementos individuales de tensión superficial, para iones acuosos a condiciones ambientales y bajas concentraciones, $k_i \left[\frac{\left(\frac{mN}{m} \right)}{M} \right]$ (Marcus, 2016).

Tabla 6.1 Incrementos iónicos individuales de tensión superficial a bajas concentraciones (Marcus, 2016)

Catión	$k_i \left[\frac{\left(\frac{mN}{m} \right)}{M} \right]$	Anión	$k_i \left[\frac{\left(\frac{mN}{m} \right)}{M} \right]$
H⁺	-1.05	OH⁻	1.05
Li⁺	0.95	F⁻	0.80
Na⁺	1.20	Cl⁻	0.90
K⁺	1.10	Br⁻	0.55
Rb⁺	0.95	I⁻	-0.05
Cs⁺	0.80	SCN⁻	-0.65
NH₄⁺	0.70	NO₃⁻	0.15
(CH₃)₄N⁺	-0.10	ClO₃⁻	0.00
C(NH₂)₃⁺	0.04	BrO₃⁻	0.35
Ag⁺	0.70	IO₃⁻	0.70
Tl⁺	0.60	ClO₄⁻	-0.70
Mg²⁺	2.25	HCO₂⁻	0.20
Ca²⁺	2.10	CH₃CO₂⁻	-0.25
Sr²⁺	1.80	H₂PO₄⁻	0.95
Ba²⁺	1.10	PF₆⁻	-2.6
Mn²⁺	1.35	CO₃²⁻	0.30
Co²⁺	1.65	SO₄²⁻	0.55
Ni²⁺	1.70	CrO₄²⁻	0.85
Cu²⁺	1.25	S₂O₃²⁻	0.65
Zn²⁺	1.85	PO₄³⁻	1.10
Pb²⁺	2.05	Fe(CN)₆³⁻	1.10
UO₂²⁺	2.10	Fe(CN)₆⁴⁻	-0.05
Al³⁺	2.65		
Cr³⁺	3.70		
La³⁺	3.20		

Por su parte, Yuan y col. (2018) atribuye el cambio en la tensión superficial a la distribución de la energía de hidratación, afirmando que el cambio en la tensión superficial es el resultado de la cantidad de moléculas de agua que puede atraer un ion (número de hidratación) en las diferentes capas de hidratación.

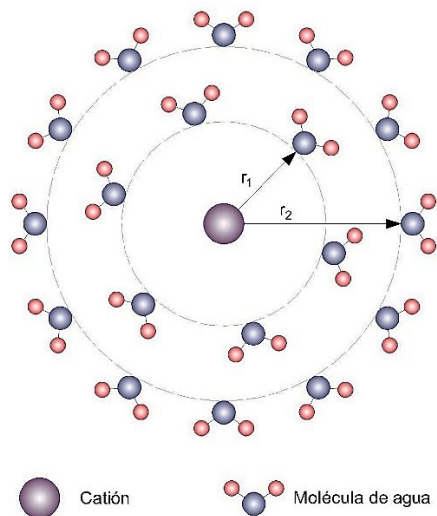


Figura 6.1 Modelo de las moléculas de agua que rodean un electrolito en un microaspecto (Yuan y col., 2018)

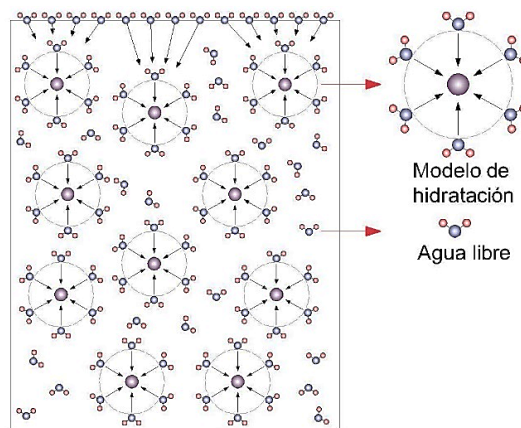


Figura 6.2 Modelo de hidratación en un macroaspecto (Yuan y col., 2018)

Si se observan las Figura 6.1 y Figura 6.2, se hace notar que los átomos de oxígeno del agua son aquellos que se encuentran alrededor del catión donde el número de moléculas de agua por capas de hidratación alrededor del ion se determina en base a la función de la distribución radial. Conforme a la Figura 6.1, r_1 es la distancia entre el ion del electrolito y la primera capa de hidratación y r_2 es la distancia entre el ion del electrolito y la segunda capa de hidratación (Marcus, 2016).

Tabla 6.2 Número de hidratación de los iones de electrolito (Marcus, 2016)

Ion	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Número de hidratación de la primera capa de hidratación	3.8469	2.9352	8.6937	7.4377
Número de hidratación de la segunda capa de hidratación	23.4057	22.3895	28.2549	26.6903

Tabla 6.3 Radio de iones, R_{0+} y R_{0-} , en Angstroms, Å (Slavchov y Novev, 2012)

Catión	$R_{0+}/\text{Å}$	Anión	$R_{0-}/\text{Å}$
Li⁺	0.69	OH⁻	1.33
Na⁺	1.02	F⁻	1.33
K⁺	1.38	NO₃⁻	1.79
NH₄⁺	1.48	Cl⁻	1.81
Rb⁺	1.49	IO₃⁻	1.81
Cs⁺	1.70	BrO₃⁻	1.91
		Br⁻	1.96
		ClO₃⁻	2.00
		HCOO⁻	2.04
		SCN⁻	2.13
		I⁻	2.20
		ClO₄⁻	2.40

Conforme a los datos de la Tabla 6.2 y Tabla 6.3, se puede observar que existe una relación entre el incremento de la tensión superficial, k_i , el número de hidratación por ion y el radio de los iones, R_0 , para bajas concentraciones. Conforme aumenta R_0 , disminuye el número de hidratación de la primera y segunda capa y por lo tanto el disminuye k_i .

La orientación promedio de las moléculas de agua en la interfaz agua/vapor es con el polo negativo del lado del vapor y el polo positivo hacia el líquido, lo que le confiere a la superficie del agua un potencial, χ_w , ubicado dentro del rango de 90 ± 60 mV (Marcus, 2016). Por ejemplo, en el estudio de soluciones electrolíticas, Leroy y col. (2010) consideran que en la superficie del agua hay una ausencia de cationes debido al tamaño de su diámetro electrostático efectivo y que el grosor de la película corresponde con la capa donde la densidad y la orientación de las moléculas del agua son diferentes al del seno. Por todo lo anterior Leroy y col. (2010) consideran en su estudio que los únicos iones presentes en la superficie aire/agua son los aniones. Por otra parte, la distribución de iones en la interfaz agua-aire depende de la disponibilidad de moléculas de agua hidratantes en la superficie, siendo la saturación en la interfaz dependiente del número de hidratación de cada ion. Esto quiere decir que incluso cuando los iones se encuentren fuertemente adsorbidos en la interfaz, a concentraciones bajas en el seno del líquido, a grandes

concentraciones, la superficie se satura, y la densidad de los iones en la región interfacial puede llegar a ser más baja que la que se encuentra en el seno del líquido, en otras palabras, la concentración de iones en la superficie es independiente de la concentración en el seno del líquido (Manciu y col., 2017). A bajas concentraciones ($>0.01\text{M}$), Petersen y Saykally (2005) argumentan que la cobertura máxima en la superficie es aproximadamente de $10^{10} - 10^{11}/\text{cm}^2$, que corresponde a un anión por cada 20000 - 300000 moléculas de agua lo que origina el efecto Johes-Ray. Un dato interesante, es que a muy bajas concentraciones de electrolito la tensión superficial disminuye, tal y como lo muestra en su estudio Okur y col. (2017), donde al utilizar como electrolito NaCl y H_2O y D_2O como disolventes se obtuvo que la tensión superficial mínima fue a una concentración de $2 \pm 1 \text{ mM}$ ($\Delta\sigma = -0.24 \text{ mJ}/\text{m}^2$) y $\sim 14 \text{ mM}$ ($\Delta\sigma = -0.29 \text{ mJ}/\text{m}^2$) respectivamente. Se asume que esta tensión superficial mínima se origina a partir de la interacción *agua-agua inducida* debido a los iones en el seno del líquido, en lugar de la adsorción de los iones en la interfaz. Por lo que a medida que se agregan iones al agua, la red de puentes de hidrógeno responde al campo electroestático colectivo de los iones al aumentar el orden de su orientación. Por otro lado, Marcus (2016) argumenta que los estudios con respecto a los cambios en la tensión superficial de soluciones electrolíticas no pueden únicamente utilizar en sus modelos interacciones electrostáticas de largo alcance sino que deben incluir propiedades como la refractividad molar iónica, la suavidad iónica, ambas medidas de la polarización iónica, la propiedad de creación/ruptura de la estructura del agua, el parámetro de volumen electrorestrictivo molar iónico (principalmente para cationes) y el decremento dieléctrico molar iónico, donde las últimas dos propiedades pertenecen al número de moléculas de agua inmovilizadas en las capas de hidratación de los iones.

Capítulo 7

Desarrollo experimental

7.1 Construcción y arreglo de la celda de burbuja ascendente diseñada por del doctor Garfias, F. J.

El diseño de la celda y su operación fue desarrollado por el Dr. Francisco Javier Garfias y Ayala. El costo de la celda fue de \$20 000.00 MN y el de la cámara y el sistema de ajuste de \$25 000.00 MN, siendo un total de \$45 000.00 MN + IVA. La celda consta de tres partes (ver Figura 7.1):

1. Una cámara interna donde se introduce la muestra,
2. una segunda cámara que rodea la primera, la cual tiene la función de baño de agua, y
3. una mirilla de cuarzo ubicada a la altura donde se lleva a cabo el crecimiento de la burbuja.

Las partes mencionadas en el punto 1 y 2 están constituidas por placas de acrílico debido a su alta transparencia, fácil manufactura, ligereza y compatibilidad con los líquidos a evaluar y el punto 3 está constituido por vidrio de cuarzo debido a sus propiedades mecánicas (resistencia a choques térmicos, resistencia al rayado, entre otras), su buena transmisión óptica y resistencia al contacto con diferentes especies químicas.

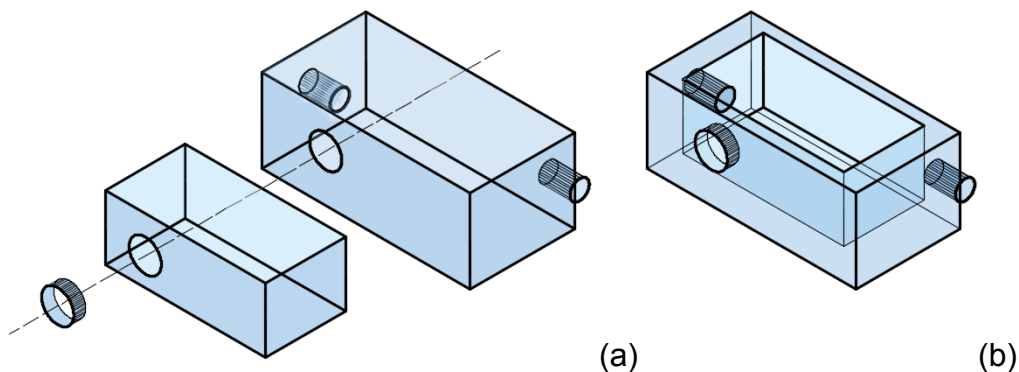


Figura 7.1 Diagrama de la celda a validar: (a) mirilla de cuarzo, recipiente interno para recepción del líquido a evaluar, zona para baño de agua y (b) celda armada

Dentro de la celda se coloca un capilar de vidrio (ver Figura 7.3), que cuenta con un orificio de radio igual a 1.16 mm por donde emerge la burbuja. La superficie alrededor del orificio debe estar pulida (ver Figura 7.4.b), lo cual se logra mediante lijas de diferente tamaño de grano con lo cual se obtiene una superficie suave, lo que evita el desplazamiento de la burbuja y variaciones en las mediciones debido a imperfecciones en la superficie del capilar. El objetivo es obtener una burbuja con una base tal y como se muestra en la Figura 7.2.



Figura 7.2 Capilar de vidrio utilizado dentro de la celda

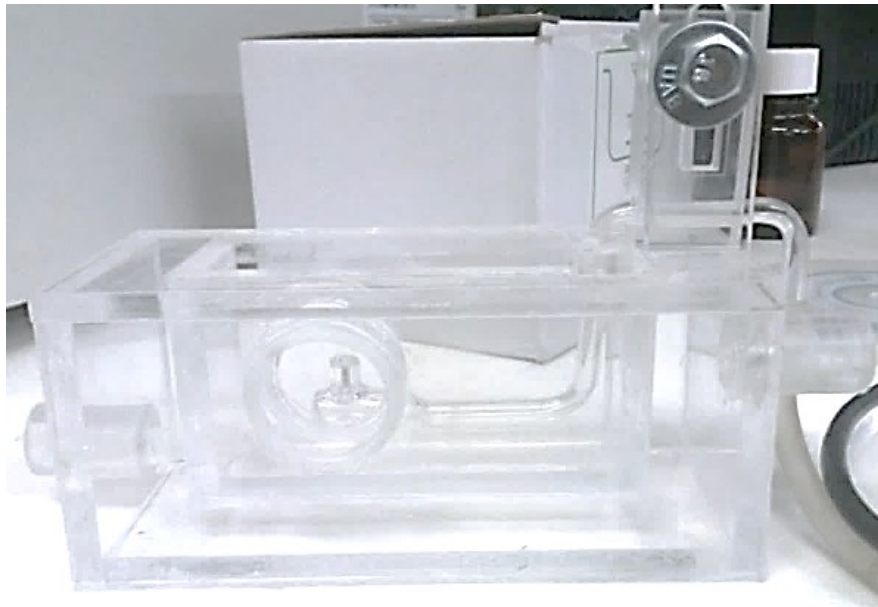


Figura 7.3 Celda utilizada durante la experimentación con el capilar previamente montado



(a)



(b)

Figura 7.4 (a) Superficie del capilar sin pulir, (b) Superficie del capilar pulido

En las Figura A.1 y Figura A.2 del Anexo A se muestran las medidas del equipo y del capilar utilizados en la experimentación. Los elementos periféricos a la celda se muestran en la Figura 7.5 y en la Figura 7.6 el sistema completo experimental con la adquisición de datos.

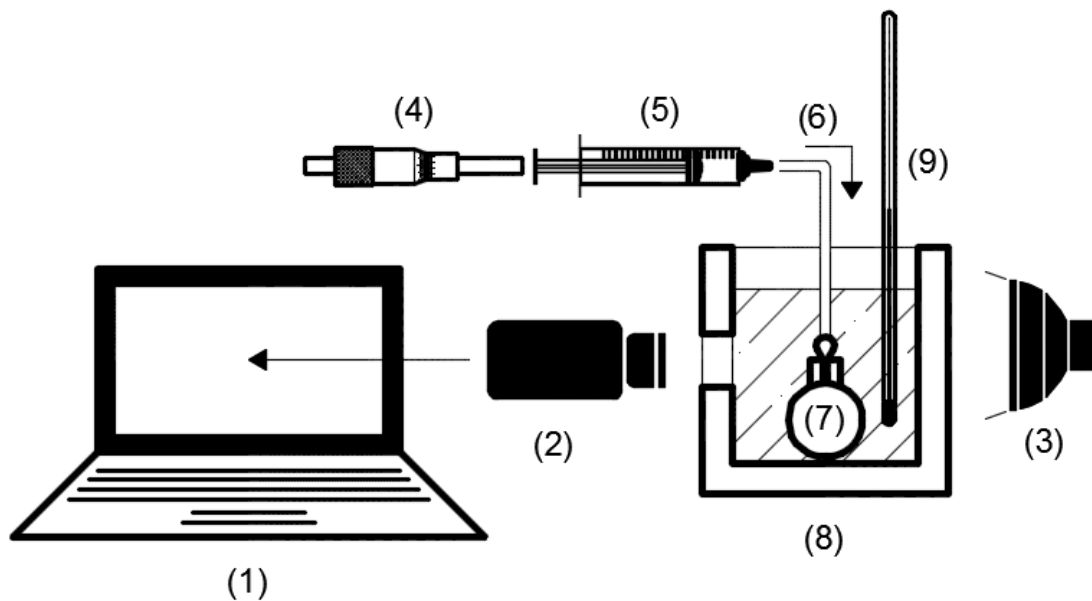


Figura 7.5 Diagrama del equipo utilizado para determinar la tensión superficial mediante el método de burbuja ascendente: (1) Computadora portátil, (2) cámara de alta definición, (3) luz led color blanco, (4) tornillo micrométrico, (5) jeringa, (6) manguera de hule, (7) capilar de vidrio, (8) celda de acrílico con mirilla de cuarzo y (9) termómetro



Figura 7.6 Arreglo de la celda y los elementos periféricos durante la experimentación

El software utilizado para capturar las imágenes es S-EYE, el cual permite ajustar el brillo, el contraste, la saturación de color, el matiz, gamma y la nitidez de la imagen para facilitar su posterior tratamiento. La cámara, la calidad de la imagen y el formato de salida se ajusta dentro del círculo azul de la Figura 7.7 y los ajustes de parámetros se aplican dentro del círculo verde de la Figura 7.7. La resolución de imagen elegida durante la experimentación fue de 1600 x 1200 píxeles.

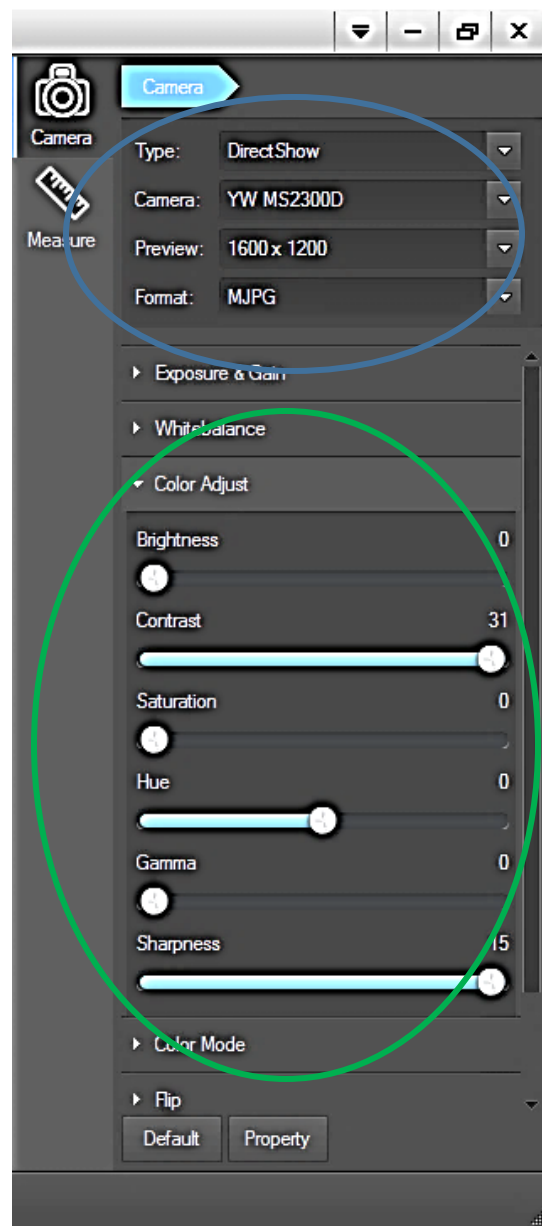


Figura 7.7 Ajustes de calidad de imagen y parámetros de salida de imagen

Otro parámetro que permite ajustar el software es el intervalo de tiempo entre fotografías y la cantidad de exposiciones consecutivas, de modo que se pueda obtener una secuencia de imágenes durante la evolución de la burbuja. El tiempo mínimo entre exposiciones varía entre 0.30 y 0.45 segundos al colocar el intervalo entre exposiciones en “0” segundos, Figura 7.8.

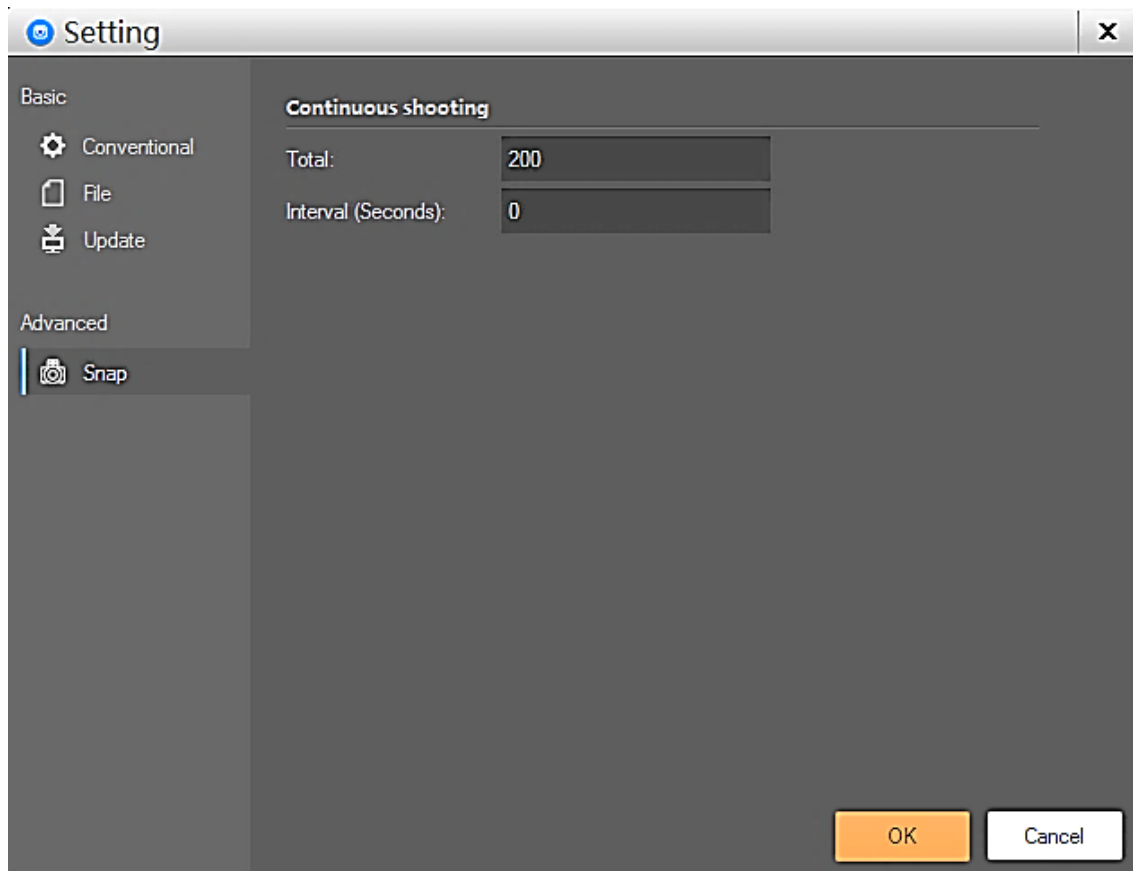


Figura 7.8 Ajuste del número de fotografías e intervalos de tiempo entre exposiciones

La cámara utilizada, modelo YW2300 (ver Figura 7.9), enfoca la imagen mediante dos acciones: la primera es mediante una perilla ubicada en la parte inferior de la estructura alojada sobre un riel de aluminio, la cual aleja o acerca la cámara de la celda y la segunda, es mediante un sistema integrado a la cámara que permite el movimiento del lente y un enfoque más fino. Esta cámara tiene un sensor de 1.3", una resolución de 1600 x 1200 @15FPS (full HD) y salidas USB 2.0, VGA y Cvbs. La cámara permite el ajuste de color, brillo, nitidez, saturación, resolución, contraste, zoom digital, reducción de ruido, balance de blancos y de brillo automático y ajuste de tamaño de líneas.

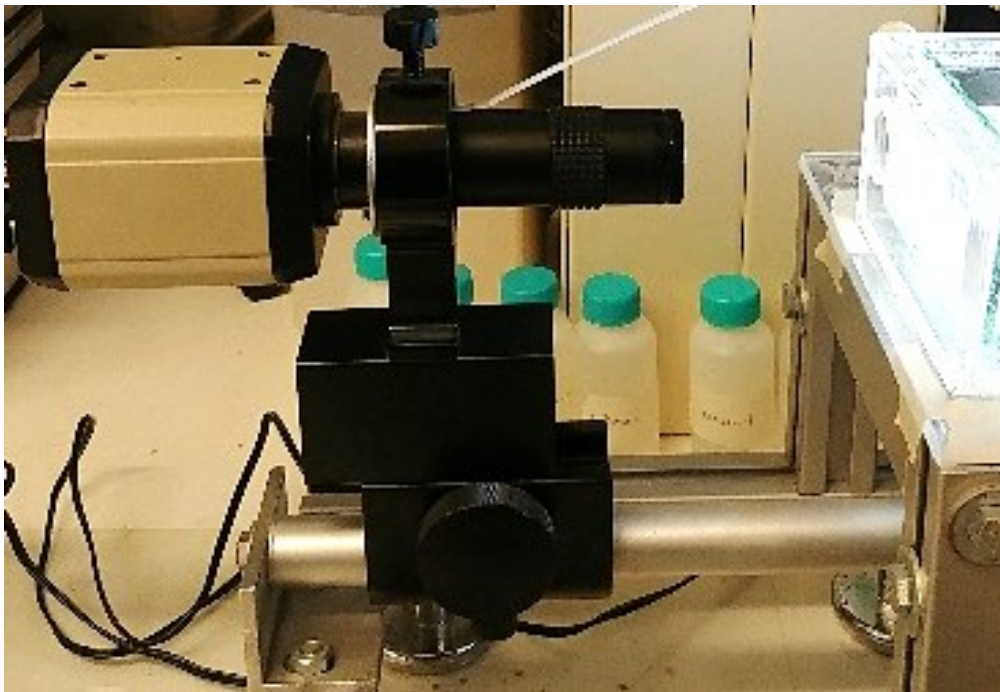


Figura 7.9 Disposición de la cámara y la celda sobre la estructura de aluminio

El flujo de aire es manipulado mediante el uso de un tornillo micrométrico que empuja al embolo de una jeringa de plástico de 8.30 ± 0.01 mm de diámetro interno y un volumen de 5 mL. El aire entonces es transportado mediante una manguera de silicón hasta el capilar donde se formará la burbuja.

El diseño de la celda, la estructura de aluminio y la configuración del equipo fueron desarrollados por el Dr. Francisco Javier Garfias y Ayala y construido por Adolfo López Ángeles.

7.2 Metodología para la determinación de la tensión superficial cuasi-estática mediante el crecimiento de burbuja.

7.2.1 Procedimiento experimental

Objetivos de la metodología planteada:

- Reducir el gradiente de temperatura al mínimo y mantener la temperatura constante durante la experimentación.
- Obtener datos experimentales de densidad de cada uno de los líquidos a diferente temperatura.
- Llevar a cabo la experimentación siempre con el mismo volumen de líquido.
- Tratar de mantener la celda lo más limpia posible sin dañar el acrílico del cual está constituida.

1. Calibrar el baño de agua a la temperatura deseada.
2. Determinar la densidad del líquido a evaluar a la temperatura deseada, con un picnómetro calibrado con termómetro de 50 mL marca ISOLAB y una balanza analítica OHAUS PIONEER ANALYTICAL. (El volumen reportado del picnómetro calibrado es de 49.230 ± 0.0005 mL y tiene un peso de 42.941 ± 0.001 g).
3. Verter el líquido contenido en el picnómetro dentro de la celda.
4. Cubrir la celda con PARAFILM y dejar el líquido reposar dentro de la celda por un lapso de 10 minutos.
5. Pasado el tiempo de reposo, apagar el sistema de baño de agua para evitar perturbaciones al momento de llevar a cabo las mediciones debido a las vibraciones.
6. Alimentar la burbuja con un flujo aproximado de 6 mL/h mediante el uso de un tornillo micrométrico.
7. Capturar imágenes del crecimiento de la burbuja aproximadamente cada 0.4 segundos.

8. De ser necesario, se hace uso del baño de agua para volver a llegar al equilibrio térmico.

9. *En el caso de los alcoholes:*

- a. Los alcoholes puros utilizados son: 1-Hexanol de Sigma-Aldrich, 1-Octanol de Sigma-Aldrich y 1-Decanol de Sigma-Aldrich.
- b. Lavar el equipo con agua oxigenada diluida y posteriormente con etanol para retirar el alcohol residual adherido en las paredes de la celda.
- c. Repetir el lavado las veces que sea necesario (hasta ya no percibir el aroma del alcohol).
- d. Enjuagar el equipo con agua desionizada.
- e. Depositar los alcoholes en recipientes poliméricos con tapón de sellado para evitar su evaporación y marcar los recipientes de forma adecuada (compuesto, fecha, nombre).

10. *En el caso de los electrolitos:*

- a. Reactivos utilizados:
 - i. Agua desionizada,
 - ii. cristales de cloruro de sodio, $NaCl$, marca J.T. Baker grado analítico,
 - iii. cristales de cloruro de potasio, KCl , para análisis marca Merck, con una pureza mínima del 99.5%, y
 - iv. cloruro de calcio dihidratado, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, marca J.T. Baker, grado analítico
- b. Limpieza del material previa a la experimentación
 - i. Utilizar una charola nueva para pesado con cada reactivo

- ii. Espátula
 - 1. Lavar con un tensoactivo comercial. En este estudio se utilizó jabón marca “Roma®”.
 - 2. Enjuagar y tallar varias veces con agua corriente y una esponja limpia y finalizar con un enjuague de agua desionizada.
- iii. Matraces
 - 1. Tallar varias veces con agua corriente y cepillo y finalizar con un enjuague de agua destilada.
- iv. Picnómetro
 - 1. Lavar con peróxido de hidrógeno y acetona (por si llegaran a existir trazas de alguna sustancia orgánica)
 - 2. Enjuagar con agua desionizada.
- c. Preparación de disoluciones
 - i. Concentraciones de las soluciones de los electrolitos utilizados en un volumen de 100 mL (Tabla 6.1):
 - 1. NaCl: 0.1 M, 0.2 M, 0.4 M, 0.6 M, 0.8 M, 1.0 M y 2.0 M
 - 2. KCl: 1.0 M
 - 3. CaCl₂: 1.0 M.
 - ii. Agitar suavemente los cristales y el agua desionizada contenidos dentro del Matraz para lograr la completa disolución de los cristales.
 - iii. Depositar las soluciones electrolíticas en recipientes poliméricos con tapón de sellado para evitar la evaporación del agua y consecuentemente cambios en la concentración.
 - iv. Marcar los recipientes de forma adecuada (compuesto, concentración, fecha, nombre).
 - v. Lavar el equipo con agua desionizada al término de la experimentación y dejar secar.

7.2.2 Tratamiento de imágenes mediante MATLAB®

Objetivos del tratamiento de imágenes:

- Reducir el ruido causado por el tipo de iluminación.
 - Mejorar el balance de blancos y negros.
 - Obtener un contorno suave del perfil de la burbuja o gota.
1. Convertir las imágenes a tonos de grises.
 2. Ajustar los límites superior, inferior, izquierdo y derecho lo más cercano al perfil de la burbuja o gota.
 3. Ajustar el nivel de la imagen para convertirla en una señal binaria (negro = 0, blanco = 1).
 4. Extraer las áreas blancas en dos etapas y organizar estas áreas por tamaño. En cada caso se debe seleccionar manualmente las áreas deseadas que describan el perfil de la burbuja o gota y los extremos del capilar.
 5. La función de contorno “*Canny*” extrae el contorno del perfil de la burbuja y la función “*imerode*” erosiona el contorno a un solo pixel de grosor.
 6. Identificar los pixeles negros que conforman el contorno y traducirlos en puntos coordenados.
 7. Seleccionar manualmente la coordenada a partir de la cual comienza el perfil de burbuja o gota y termina el capilar.
 - 7.1. Al medir el diámetro exterior del capilar y determinar sus coordenadas (x,z), se establece la relación pixel/cm.
 8. Seleccionar manualmente el lado izquierdo o derecho de la burbuja o gota.

(ver

Anexo B)


7.2.3 Determinación de la tensión superficial mediante MATLAB®

Objetivos para determinar la tensión superficial y diversos parámetros:

- Evaluar los tres métodos propuestos para determinar la tensión superficial.
- Determinar los factores:
 - Volumen de la burbuja
 - Ángulo de contacto entre la burbuja y el capilar, θ_0
 - Altura de la burbuja
 - Radios de curvatura R_1 y R_2 a lo largo del contorno de la burbuja
 - Radio de curvatura equivalente R_0
 - Diámetro de la burbuja en el ecuador, d_e
 - Diámetro equivalente, d_n
 - Radio de orificio del capilar, r_c

(ver

Anexo B)

1. Fijar la temperatura de la sustancia a evaluar.
2. Elegir la sustancia dentro del programa.
3. Densidad del aire (*Opcional*).
 - 3.1. Fijar la temperatura ambiental.
 - 3.2. Fijar la presión atmosférica en *hPa*.
 - 3.3. Fijar la humedad relativa.
 - 3.4. Fijar la fracción de CO₂ en el aire.
4. Iniciar el programa mediante el icono  .
5. El programa determina la tensión superficial mediante tres métodos:
 - 5.1. Método 1: Ecuación de Andreas y col. (1937) para gotas pendientes adecuada para burbujas ascendentes (Sobol y col., 1976).
 - 5.2. Método 2: Ecuación de Young-Laplace.

- 5.3. Método 3: Arreglo de la ecuación de Vafaei y col. (2010). Balance de fuerzas.
6. El programa muestra los valores del volumen (cm^3), altura (cm) y ángulo de contacto ($^\circ$) de burbuja o gota y la relación cm/pixel.
7. Es posible desplegar también las opciones:
- 7.1. Imagen en escalas de grises
 - 7.2. Imagen binaria
 - 7.3. Gráfica de contorno de burbuja
 - 7.4. Gráfica de contorno de capilar
 - 7.5. Gráfica del contorno izquierdo o derecho de la figura o ambas
 - 7.6. Gráfica de la regresión polinomial para la obtención del radio equivalente de la burbuja o gota con sus residuales
 - 7.7. Gráfica de la regresión racional del contorno la burbuja o gota con sus residuales
 - 7.8. Gráfica de la primera y segunda diferencial del polinomio racional
 - 7.9. Gráfica de radios de curvatura y su suma
 - 7.10. Gráfica del ángulo en grados conforme al eje z o al eje x
 - 7.11. Gráfica del seno, coseno, tangente y secante conforme al eje "z" o "x"
 - 7.12. Gráfica de los radios de curvatura, su suma y el valor ajustado de la suma conforme al radio de curvatura
 - 7.13. Gráfica de la tensión superficial respecto al eje z
 - 7.14. Gráfica del factor β conforme al eje z.
- a) La regresión sobre el contorno de la burbuja o gota se lleva a cabo mediante un polinomio racional ajustado y se optimiza mediante el método Levenberg-Marquardt.
- b) El ajuste de la suma de radios de curvatura se lleva a cabo mediante el método Bisquare.

Capítulo 8

Resultados

Algunos de los parámetros tomados en cuenta durante la experimentación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8.1 Parámetros tomados en cuenta durante la experimentación

Descripción	Magnitud	Unidad
Flujo de aire aproximado	6	mL/h
Diámetro del orificio del capilar	1.12 ± 0.01	mm
Volumen utilizado en la celda	49.230	mL
Aceleración de gravedad local*	977.9416	m/s ²

*Dato de aceleración de la gravedad tomado de Sobol et al. (1976)

8.1 Crecimiento cuasi-estático de una burbuja.

En la Figura 8.1 y Figura 8.2 se muestra una secuencia de fotografías tomadas durante el crecimiento cuasi-estático de una burbuja en agua. Y en la Gráfica 8.1 y Gráfica 8.2 se muestra el cambio del perfil de una burbuja contenida en hexanol y una solución de NaCl 2.0 M respectivamente durante el crecimiento cuasi-estático.

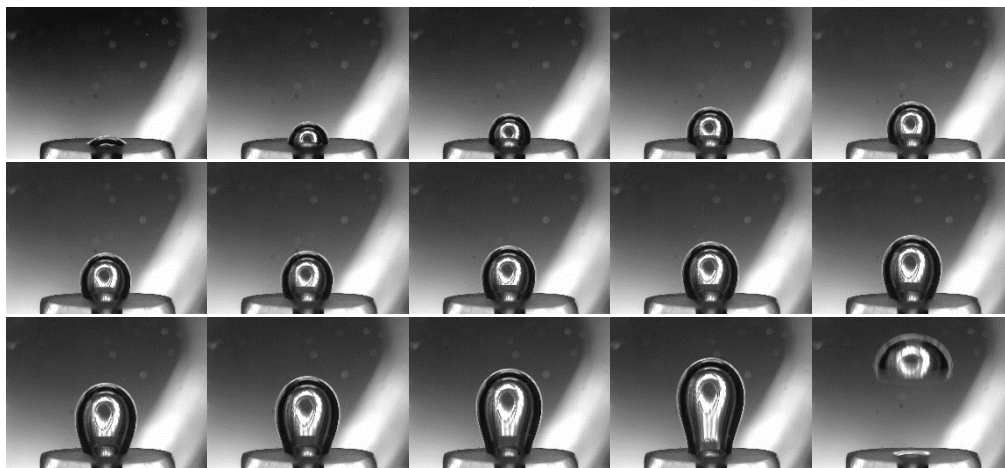


Figura 8.1 Vista del crecimiento cuasi-estático de una burbuja de aire a partir de un capilar sumergido en agua sin una alineación precisa entre el eje focal de la cámara y el capilar con un orificio tipo cono

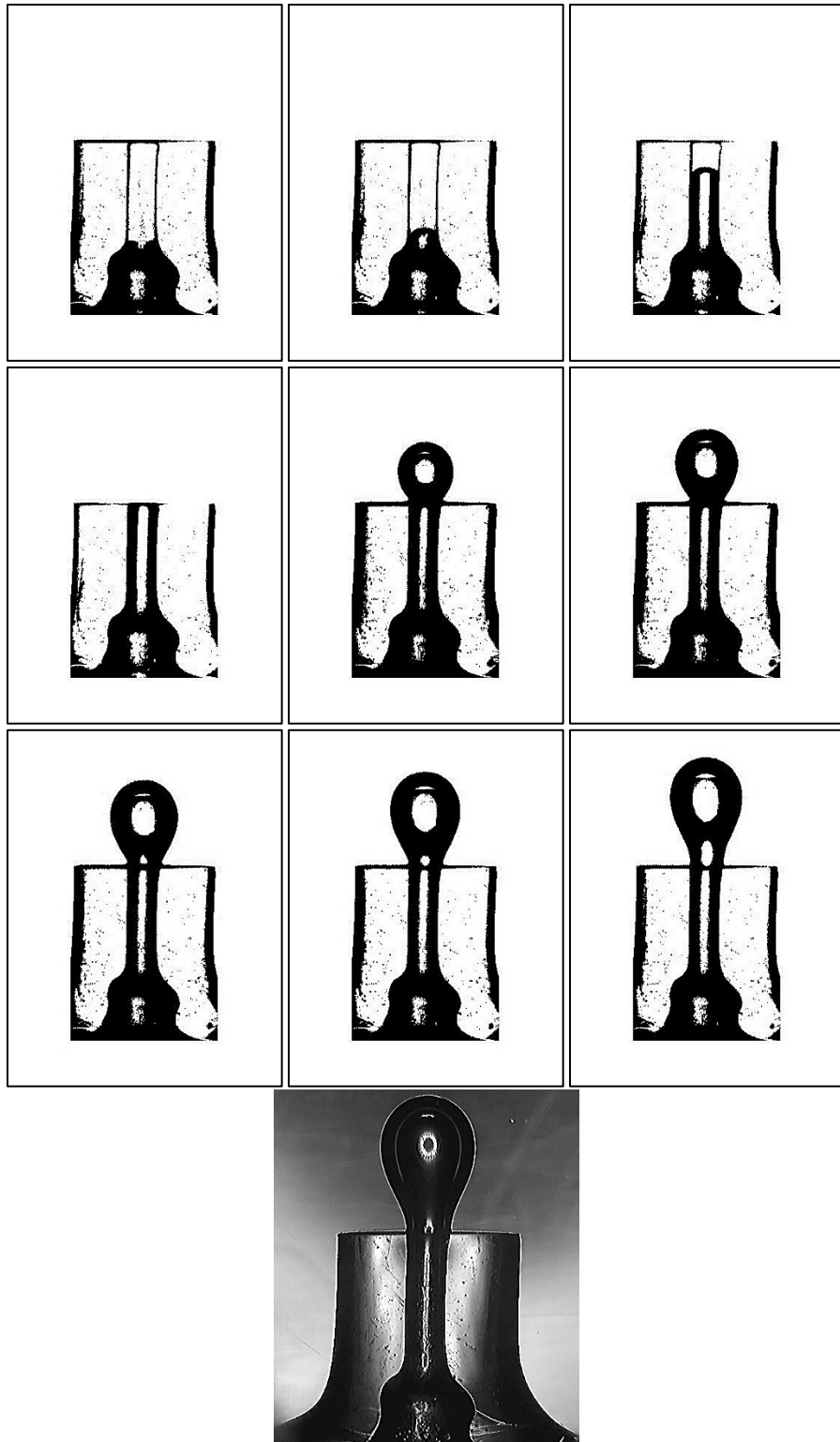
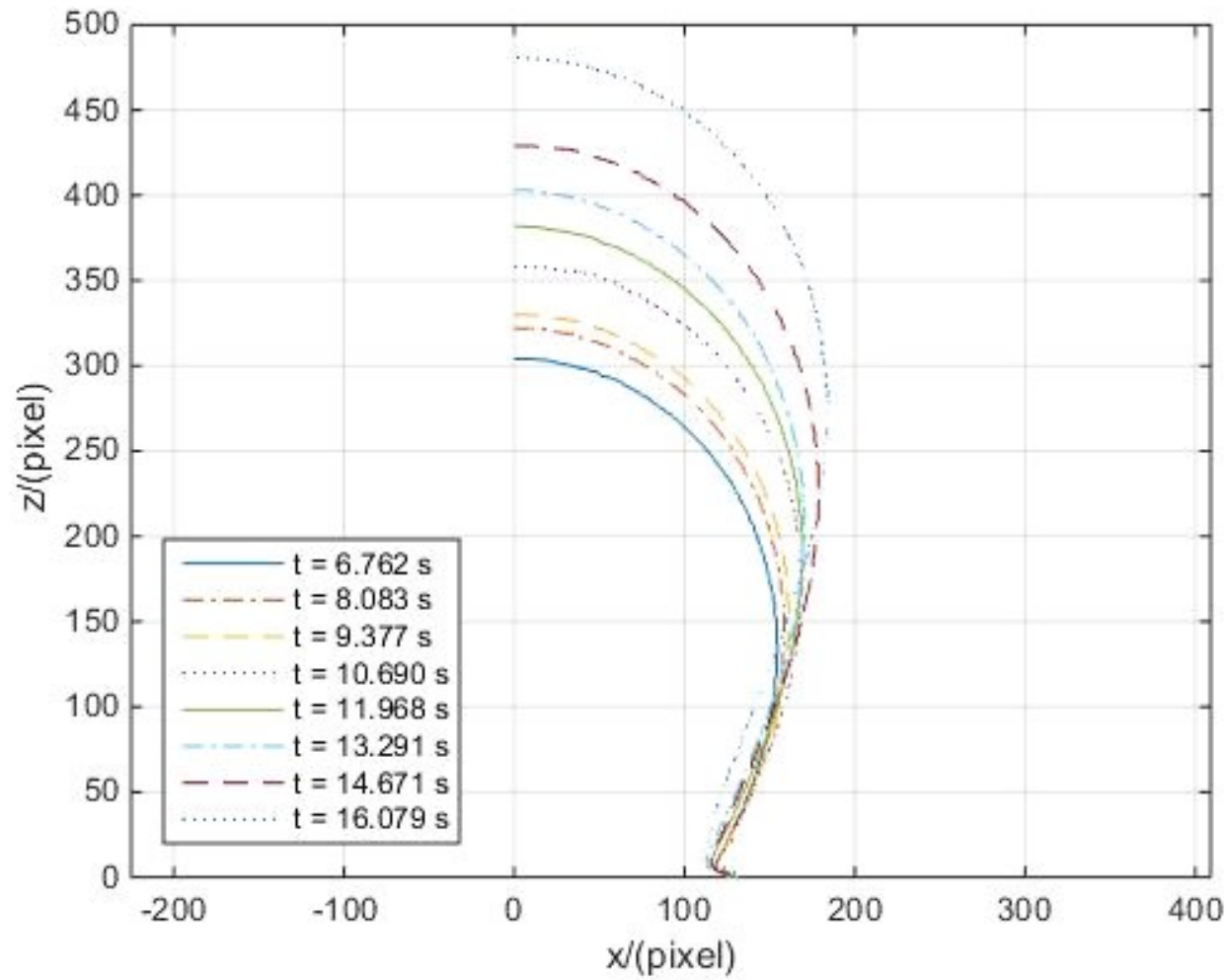
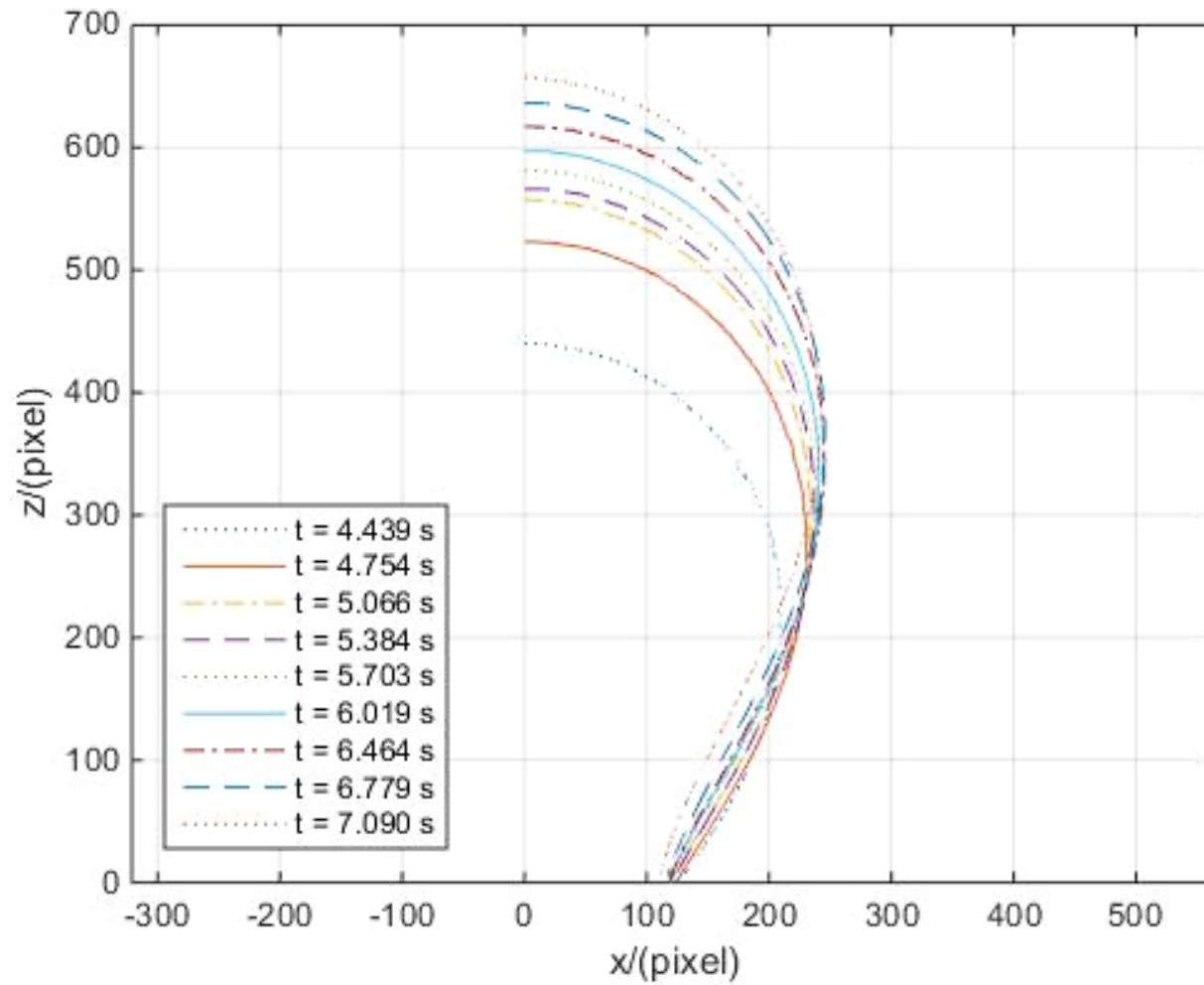


Figura 8.2 Vista panorámica del crecimiento cuasi-estático de una burbuja de aire a partir de un capilar sumergido en agua con el eje focal de la cámara y el capilar con orificio tipo recto alineados adecuadamente



Gráfica 8.1 Crecimiento cuasi-estático de una burbuja de hexanol a 10°C



Gráfica 8.2 Crecimiento cuasi-estático de una burbuja en una solución de NaCl 2.0 M a 25°C

8.2 Comparación entre la Celda construida y un equipo de referencia

En la Tabla 8.2 y Tabla 8.3 presentadas a continuación se muestra la comparación entre los valores obtenidos mediante la instrumentación “*Attension theta-lite*” (ver Figura 8.3) y la celda construida. Los resultados presentados de tensión superficial, β y volumen se obtuvieron mediante el método de Young-Laplace.

Tabla 8.2 Comparación entre la celda construida y un equipo comercial mediante el método de burbuja ascendente, TS, tensión superficial y Volumen, V

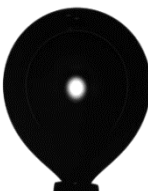
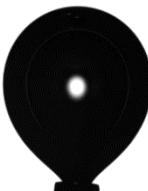
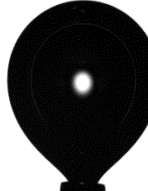
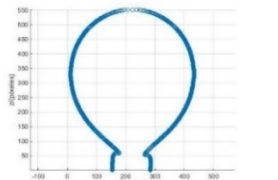
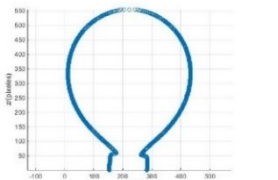
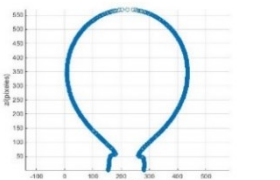
Fotografías tomadas mediante la instrumentación <i>Attension theta-lite</i>						
Obtenido mediante	<i>Attension theta-lite</i>	Algoritmo desarrollado	<i>Attension theta-lite</i>	Algoritmo desarrollado	<i>Attension theta-lite</i>	Algoritmo desarrollado
TS (mN/m)	71.75	71.76	71.78	71.78	71.96	71.97
V (cm ³)	0.0069671	0.0068674	0.0070818	0.0069205	0.0075581	0.0074039
β	0.167482	0.170989	0.169006	0.162271	0.175594	0.166108
Perfil de la burbuja dentro de un eje coordenado						

Tabla 8.3 Comparación entre la celda construida y un equipo comercial mediante el método de gota pendiente




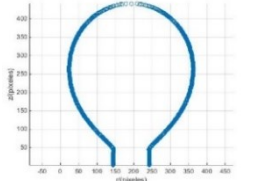
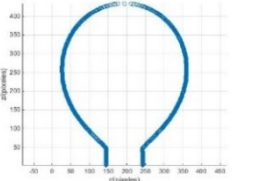
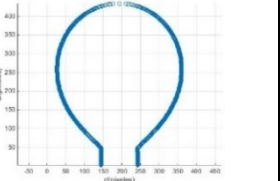
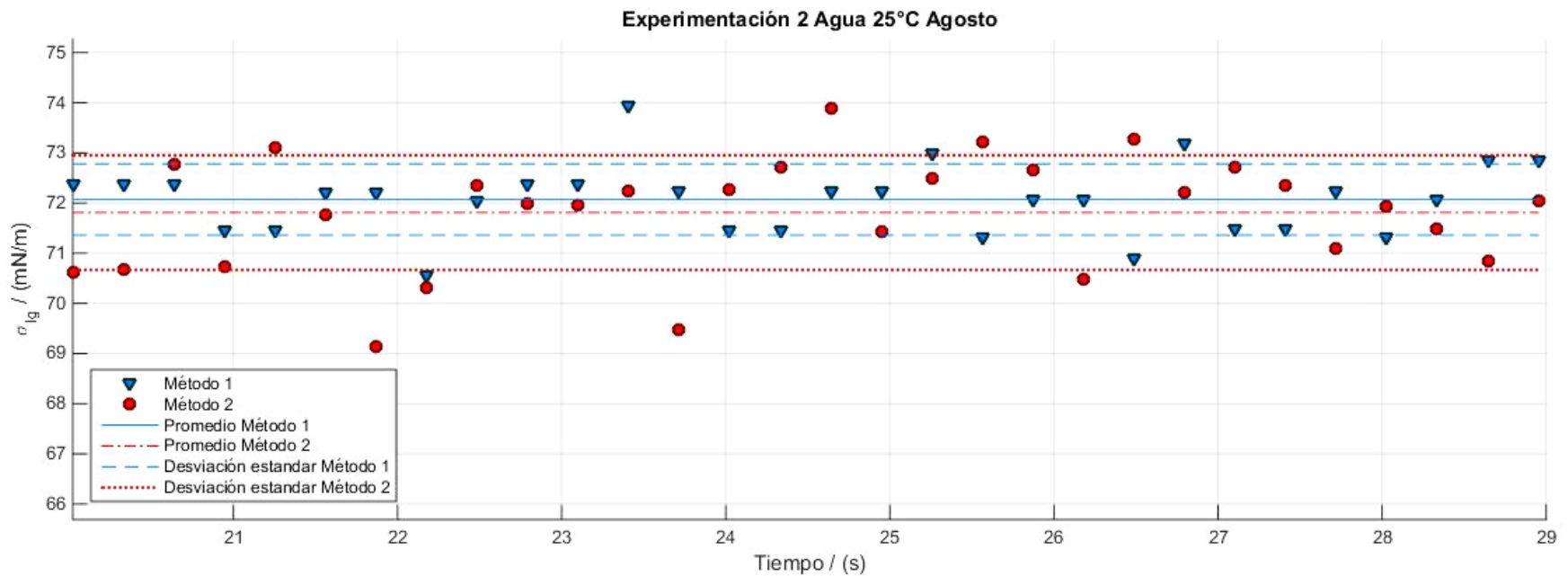
Fotografías tomadas mediante la instrumentación <i>Attension theta-lite</i>						
Obtenido mediante	<i>Attension theta-lite</i>	Algoritmo desarrollado	<i>Attension theta-lite</i>	Algoritmo desarrollado	<i>Attension theta-lite</i>	Algoritmo desarrollado
TS (mN/m)	71.85	71.85	71.78	71.78	71.82	71.82
V (cm ³)	0.00906	0.00885	0.00908	0.00878	0.00872	0.00809
β	0.194702	0.183126	0.195118	0.189136	0.190731	0.180280
Perfil de la gota dentro de un eje coordenado						



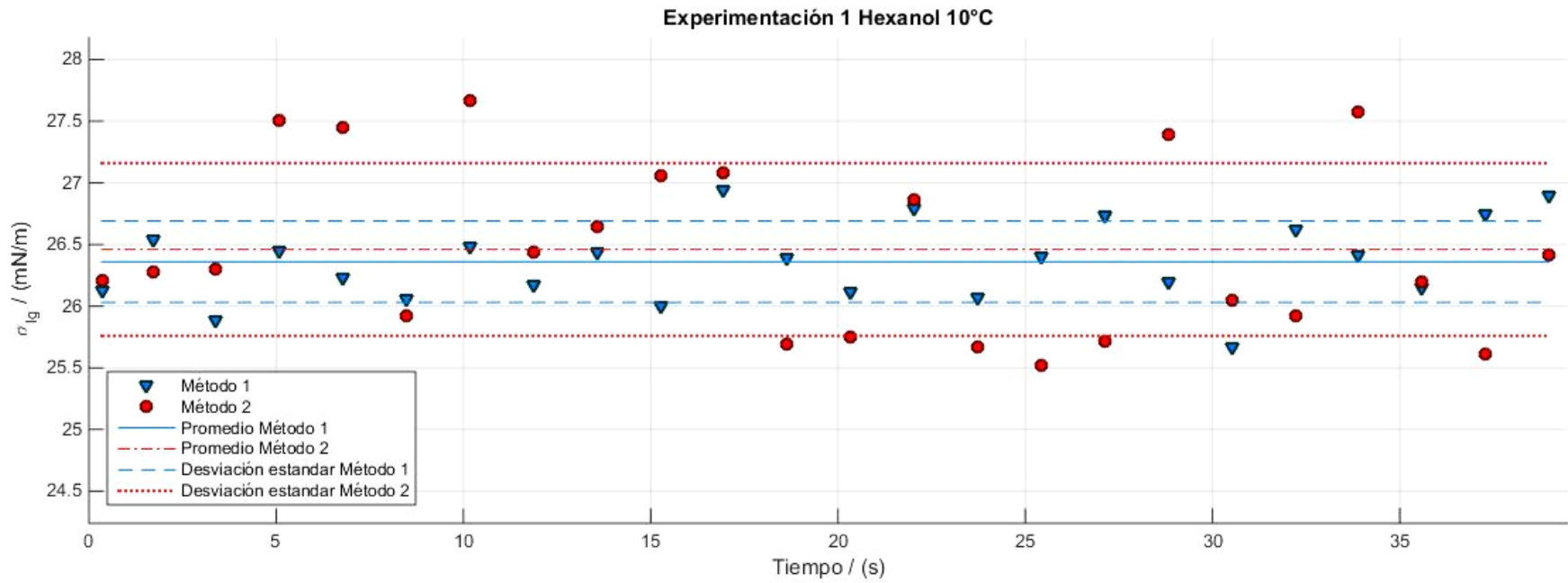
Figura 8.3 Equipo *Attension Theta Lite*

8.3 Ejemplos de determinación de tensión superficial por experimentación

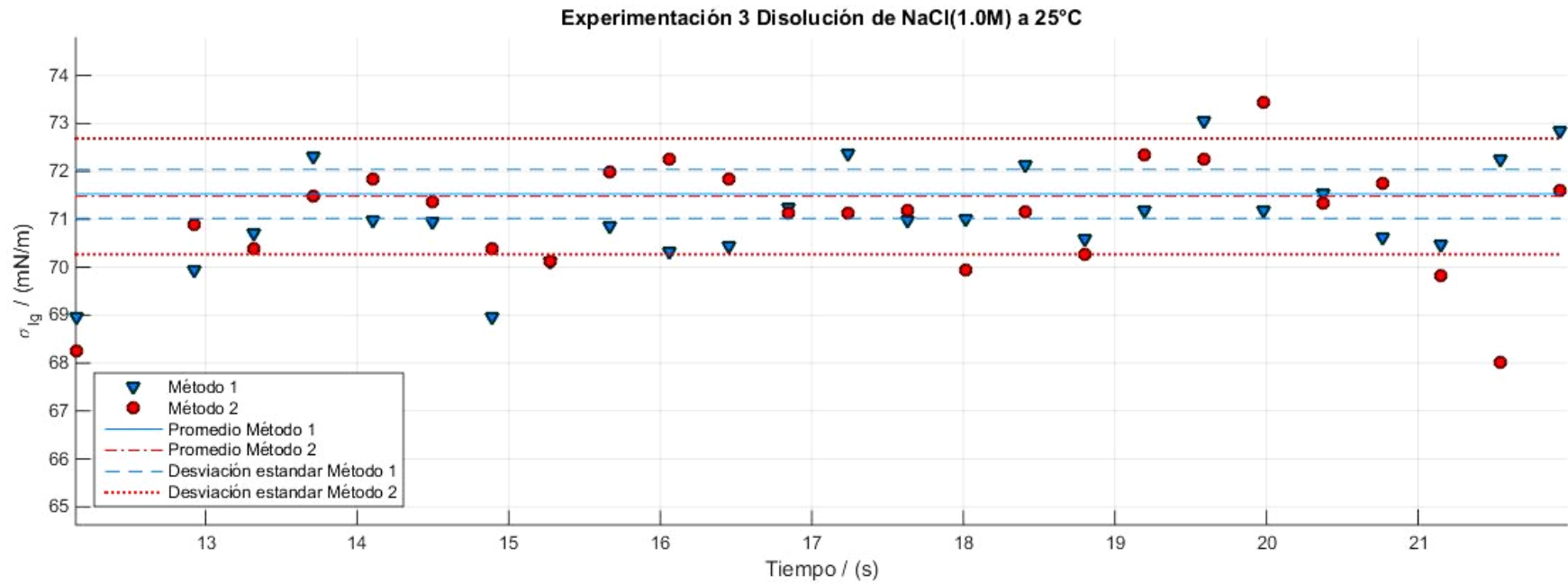
En esta sección se muestra mediante la Gráfica 8.3, la Gráfica 8.4 y la Gráfica 8.5 ejemplos de la dispersión de valores de tensión superficial obtenidos durante las experimentaciones respecto al tiempo, con diferentes sustancias y metodologías. La Gráfica 8.6 es un ejemplo de la variación del volumen, la altura de una burbuja y el ángulo de contacto de esta con el capilar conforme al tiempo.



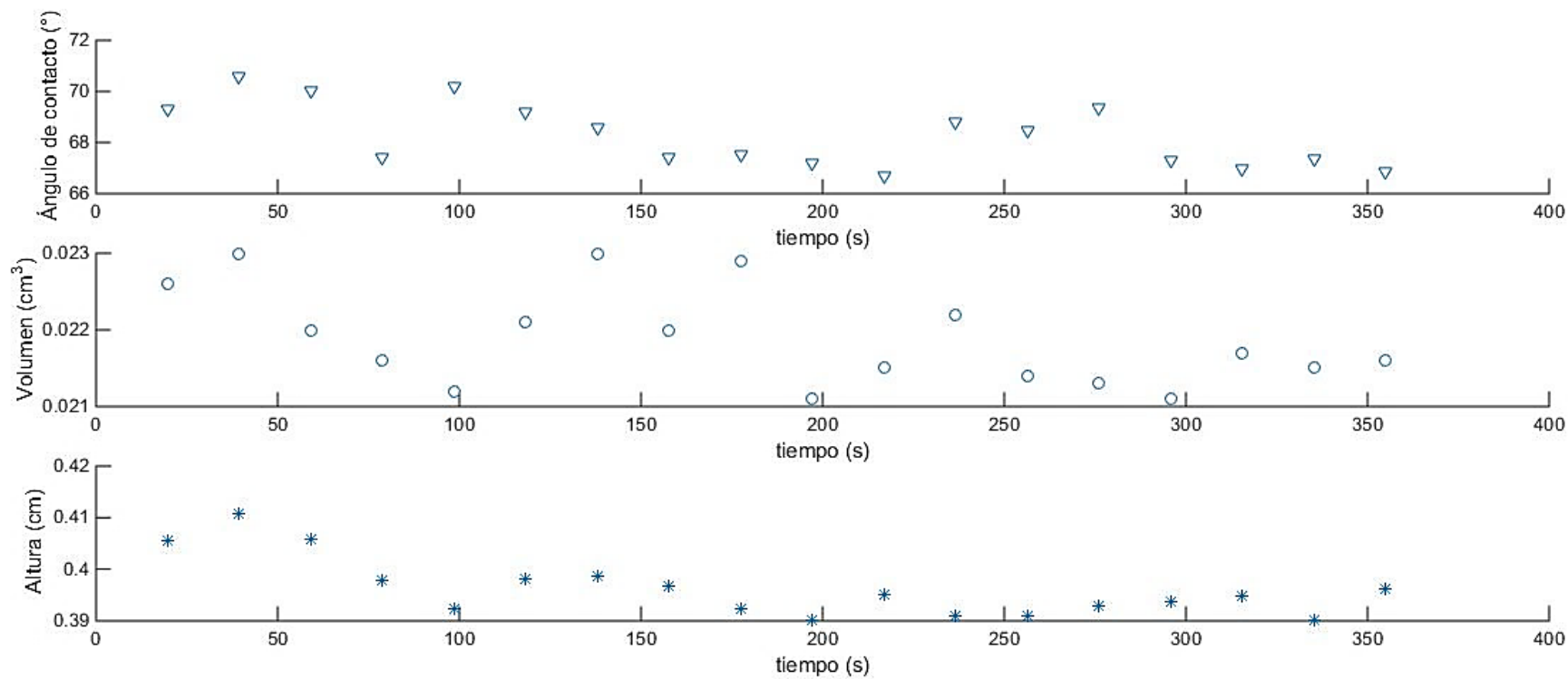
Gráfica 8.3 Experimentación 2 Agua a 25°C. Crecimiento de burbuja cuasi-estático y escala de grises. Agosto



Gráfica 8.4 Experimentación 1 Hexanol a 10°C. Tiempo de envejecimiento y escala de grises



Gráfica 8.5 Experimentación 3 NaCl 1.0 M a 25°C. Solución 1, crecimiento de burbuja cuasi-estático, escala de grises y luces del laboratorio apagadas



Gráfica 8.6 Determinación del ángulo, volumen y altura de la burbuja de la experimentación 2.2 CaCl₂ 1.0 M a 25°C

8.4 Resultados de tensión superficial

A continuación, se presentan en forma de tablas y gráficas los promedios de los valores de tensión superficial obtenidos en cada experimentación y se especifica el tipo de metodología empleada. El método numérico 1 y 2 se aplicó simultáneamente a cada una de las fotografías.

A los datos obtenidos en cada experimentación se les realizó un tratamiento estadístico para determinar la varianza y la desviación estándar de cada una de las experimentaciones. La desviación estándar de cada experimentación se consideró como la incertidumbre asociada.

8.4.1 Agua

En esta sección se presentan los valores de tensión superficial obtenidos para el agua (ver Tabla 8.4, Gráfica 8.7, Gráfica 8.8, Gráfica 8.9 y Gráfica 8.10). Cada valor expresado en la Tabla 8.4 considera la temperatura a la cual se realizó la medición, la metodología utilizada (crecimiento cuasi-estático o tiempo de envejecimiento), el método numérico (1 u 2) y el tipo de salida de imagen elegido.

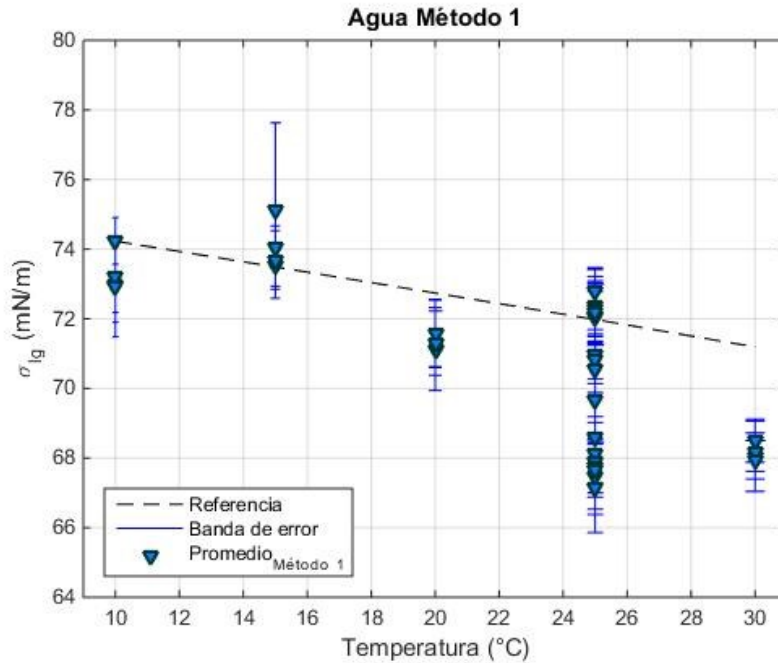
Tabla 8.4 Promedio de tensión superficial por experimento con agua desionizada (crecimiento de burbuja, C.B., tiempo de envejecimiento, T.E.).

T (°C)	Metodología	No. de experimento	Promedio	Varianza	Desviación estándar	Promedio	Varianza	Desviación estándar	Tipo de fotografía
		Unidades	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	
		Cálculo	Método 1			Método 2			
Mayo - Junio									
10	C.B.	Referencia	74.23 ^{*1}			74.23*			Gris
		1	74.24	0.45	0.67	73.36	3.15	1.77	
		2	72.99	1.19	1.09	73.52	1.85	1.36	
		3	73.23	1.11	1.05	73.38	2.23	1.49	
		4	72.93	2.12	1.45	72.50	11.02	3.32	
Promedio			73.35	1.22	1.07	73.19	4.56	1.99	
15	C.B.	Referencia	73.49 ^{*1}			73.49*			Gris
		1	73.56	0.38	0.62	72.76	3.43	1.85	
		2	74.06	0.37	0.61	73.61	1.04	1.02	
		3	73.69	0.70	0.84	73.54	1.40	1.18	
		4	75.11	6.33	2.52	74.34	0.84	0.92	
Promedio			74.10	1.95	1.15	73.56	1.68	1.24	
20	C.B.	Referencia	72.74 ^{*1}			72.74*			Gris
		1	71.59	0.94	0.97	72.51	0.80	0.90	
		2	71.13	1.41	1.19	72.95	10.25	3.20	
		3	71.57	0.93	0.97	74.08	18.67	4.32	
		4	71.30	0.85	0.92	73.33	13.95	3.73	
Promedio			71.40	1.03	1.01	73.22	10.92	3.04	

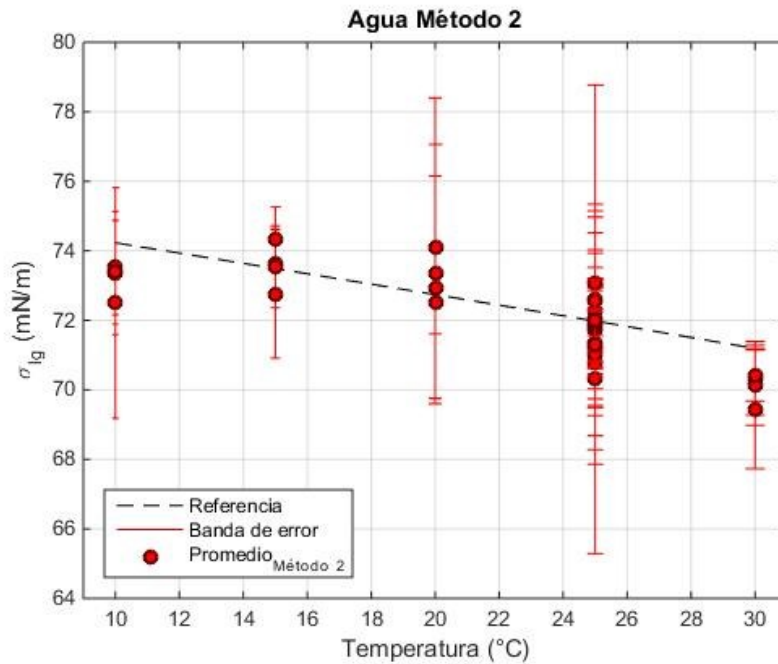
25	C.B.	Referencia	71.98 ^{*1}			71.98*			Gris
		1	68.60	0.35	0.59	72.27	2.76	1.66	
		2	68.15	0.75	0.87	71.73	1.62	1.27	
		3	67.46	1.17	1.08	71.79	5.00	2.24	
		4	67.13	1.61	1.27	70.81	4.55	2.13	
Promedio			67.83	0.97	0.95	71.65	3.48	1.83	
25	T.E.	1	69.68	0.94	0.97	71.35	3.48	1.86	Gris
Promedio			69.68	0.94	0.97	71.35	3.48	1.86	
25	C.B.	1	67.91	0.44	0.66	72.30	9.24	3.04	Blanco y Negro
		2	67.76	0.57	0.76	71.19	11.06	3.33	
		3	67.15	0.38	0.62	72.59	6.58	2.56	
		4	67.66	0.61	0.78	72.03	45.36	6.74	
		Promedio			67.62	0.50	0.70	72.03	
30	C.B.	Referencia	71.19 ^{*1}			71.19*			Gris
		1	68.05	1.02	1.01	70.33	1.12	1.06	
		2	68.17	0.31	0.55	70.13	1.32	1.15	
		3	68.50	0.38	0.62	70.43	0.57	0.75	
		4	67.95	0.31	0.55	69.44	2.93	1.71	
Promedio			68.16	0.51	0.68	70.08	1.49	1.17	

Agosto									
25	C.B.	Referencia	71.98 ^{*1}			71.98*			Gris
		1	72.29	0.64	0.80	71.04	1.68	1.30	
		2	72.07	0.50	0.71	71.81	1.29	1.14	
		3	72.05	0.95	0.98	72.54	0.97	0.98	
		4	72.35	1.15	1.07	73.08	3.56	1.89	
		5	72.80	0.45	0.67	70.31	4.10	2.03	
		6	72.27	0.90	0.95	71.84	1.45	1.20	
		7	72.17	0.69	0.83	71.93	1.26	1.12	
Promedio			72.29	0.76	0.86	71.79	2.04	1.38	
Octubre									
25	C.B.	Referencia	71.98 ^{*1}			71.98*			Gris
		1	70.98	0.50	0.71	71.32	0.86	0.93	
		2	70.85	0.51	0.71	71.98	0.78	0.88	
Promedio			71.01	0.50	0.71	71.49	0.82	0.91	
25	T.E.	1	70.56	0.47	0.68	72.01	1.37	1.17	
Promedio			70.56	0.47	0.68	72.01	1.37	1.17	

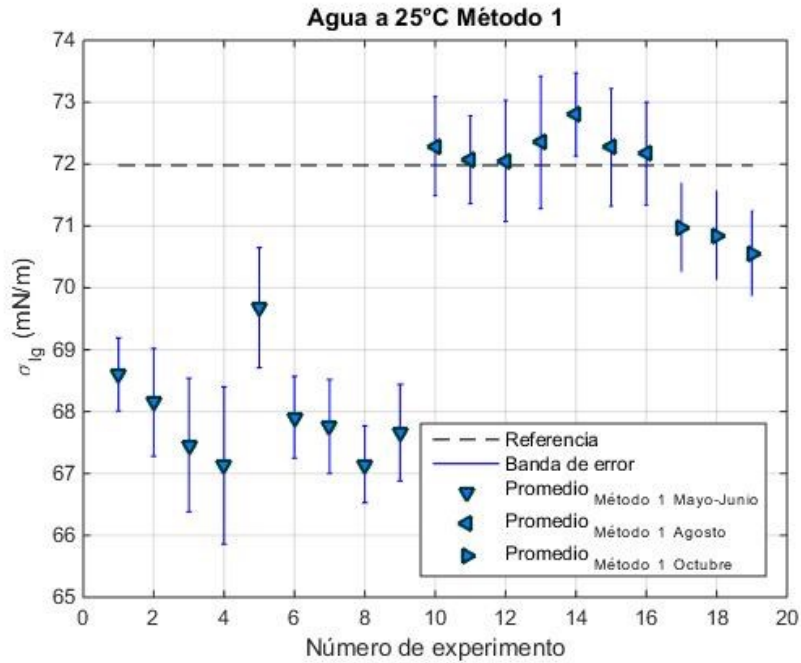
*1Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 23



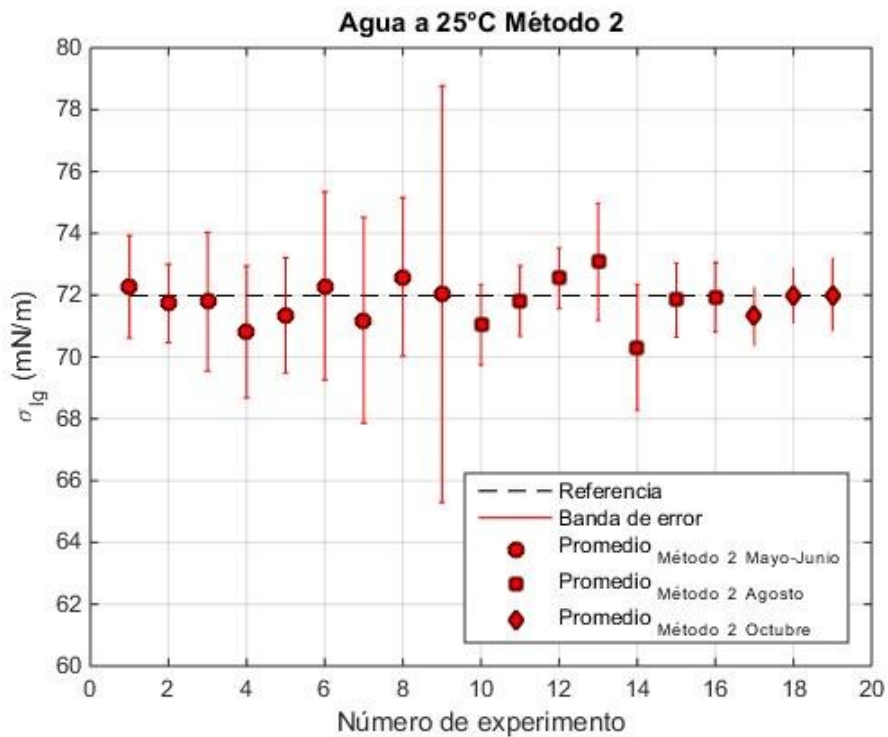
Gráfica 8.7 Promedios de la tensión superficial del agua obtenida mediante la celda y el Método 1 a diferentes temperaturas. Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 23



Gráfica 8.8 Promedios de tensión superficial del agua obtenida mediante la celda y el Método 2 a diferentes temperaturas. Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 23



Gráfica 8.9 Promedios de tensión superficial del agua obtenida mediante la celda y el Método 1 a 25°C en diferentes periodos. Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 23



Gráfica 8.10 Promedios de tensión superficial del agua obtenida mediante la celda y el Método 2 a 25°C en diferentes periodos. Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 23

8.4.1 Alcoholes

En esta sección se muestran los resultados de la tensión superficial de tres alcoholes lineales (hexanol, octanol y decanol) y la variación de los valores conforme a la temperatura y el método numérico utilizado (ver Tabla 7.5, Gráfica 8.11, Gráfica 8.12, Gráfica 8.13, Gráfica 8.14, Gráfica 8.15 y Gráfica 8.16).

Tabla 8.5 Promedios de tensión superficial por experimento de hexanol, octanol y decanol a diferente temperatura

T (°C)	Metodología	No. de experimento	Promedio	Varianza	Desviación estándar	Promedio	Varianza	Desviación estándar
		Unidades	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)
		Cálculo	Método 1			Método 2		
Hexanol								
10	C.B.	Referencia	26.89 ^{*1}			26.89		
		1	26.36	0.11	0.33	26.46	0.50	0.70
		2	27.10	0.09	0.29	27.27	3.20	1.79
		3	27.01	0.17	0.42	26.46	0.55	0.74
Promedio			26.82	0.12	0.35	26.73	1.42	1.08
15	C.B.	Referencia	26.47 ^{*1}			26.47 ^{*1}		
		1	26.23	0.18	0.43	26.42	0.38	0.62
		2	26.74	0.28	0.53	26.79	0.59	0.77
		3	27.14	0.05	0.21	26.55	0.12	0.34
Promedio			26.70	0.17	0.39	26.58	0.36	0.58

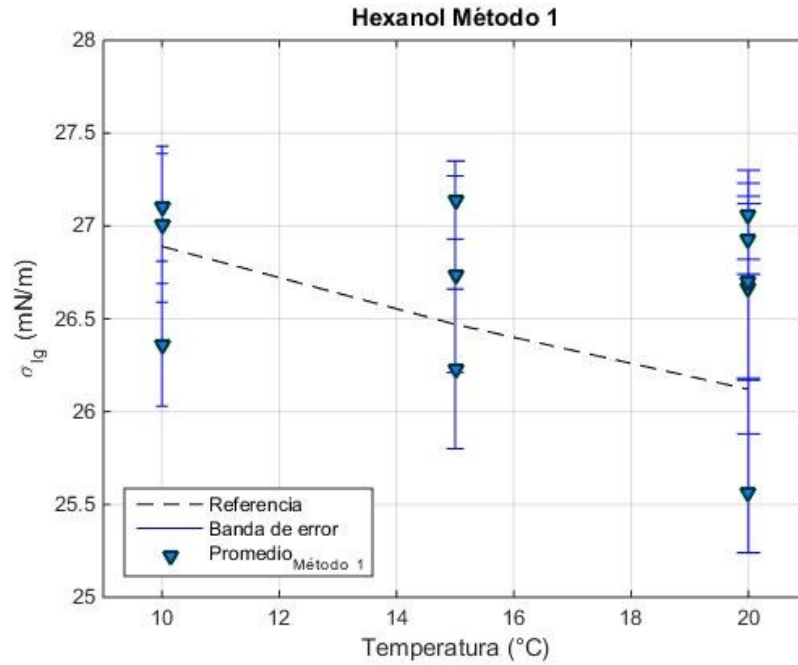
20	C.B.	Referencia	26.12 ^{*1}			26.12 ^{*1}		
		1	25.56	0.10	0.32	26.41	0.60	0.78
		2	26.67	0.24	0.49	26.60	0.64	0.80
		3	27.06	0.06	0.24	26.81	0.74	0.86
		4	26.70	0.28	0.53	26.87	0.99	1.00
		5	26.93	0.03	0.19	27.46	1.40	1.18
Promedio			26.58	0.14	0.35	26.83	0.87	0.92
Octanol								
10	C.B.	Referencia	28.08 ^{*2}			28.08 ^{*2}		
		1	27.38	0.14	0.38	28.13	0.68	0.82
		2	27.61	0.13	0.36	28.47	0.69	0.83
		3	27.42	0.20	0.45	28.23	0.58	0.76
		4	27.10	0.12	0.35	27.69	0.33	0.58
		Promedio			27.38	0.15	0.38	28.13
15	C.B.	Referencia	27.63 ^{*2}			27.63 ^{*2}		
		1	27.33	0.50	0.71	28.39	1.89	1.37
		2	27.16	0.15	0.39	29.23	1.85	1.36
		3	27.61	0.07	0.26	30.22	3.75	1.94
		4	27.59	0.07	0.27	30.24	4.81	2.19
		5	27.31	0.07	0.26	29.50	2.76	1.66
Promedio			27.40	0.17	0.38	29.52	3.01	1.71
20	C.B.	Referencia	27.28 ^{*2}			27.28 ^{*2}		
		1	27.10	0.07	0.27	29.07	1.99	1.41
		2	27.31	0.17	0.41	30.03	7.95	2.82
		3	27.21	0.08	0.28	29.08	7.55	2.75
		4	27.31	0.11	0.34	28.51	1.36	1.17
		Promedio			27.23	0.11	0.32	29.17

		Decanol						
10	C.B.	Referencia	29.60 ^{*3}			29.60 ^{*3}		
		1	27.60	0.25	0.50	28.03	2.06	1.44
		2	27.08	2.24	1.50	28.26	9.72	3.12
		3	27.29	0.44	0.66	28.14	1.95	1.40
		4	29.03	0.41	0.64	29.52	2.45	1.56
Promedio			27.75	0.83	0.82	28.49	4.05	1.88
15	C.B.	Referencia	sin dato			sin dato		
		1	27.39	0.46	0.68	30.06	7.59	2.75
		2	27.67	0.46	0.68	30.68	5.92	2.43
		3	27.49	0.27	0.52	29.60	4.32	2.08
		4	27.64	0.19	0.44	29.01	3.81	1.95
Promedio			27.55	0.35	0.58	29.84	5.41	2.30
20	C.B.	Referencia	28.80 ^{*3}			28.80 ^{*3}		
		1	27.16	0.58	0.76	29.38	1.05	1.02
		2	27.05	0.32	0.56	29.65	3.71	1.93
		3	27.21	0.33	0.57	29.39	3.86	1.97
		4	27.37	0.27	0.52	30.28	0.84	0.91
Promedio			27.20	0.37	0.60	29.68	2.36	1.46
25	C.B.	Referencia	sin dato			sin dato		
		1	27.32	0.27	0.52	27.91	0.62	0.79
		2	27.24	0.21	0.46	27.89	1.28	1.13
		3	27.29	0.26	0.51	27.83	3.91	1.98
Promedio			27.28	0.25	0.50	27.88	1.94	1.30

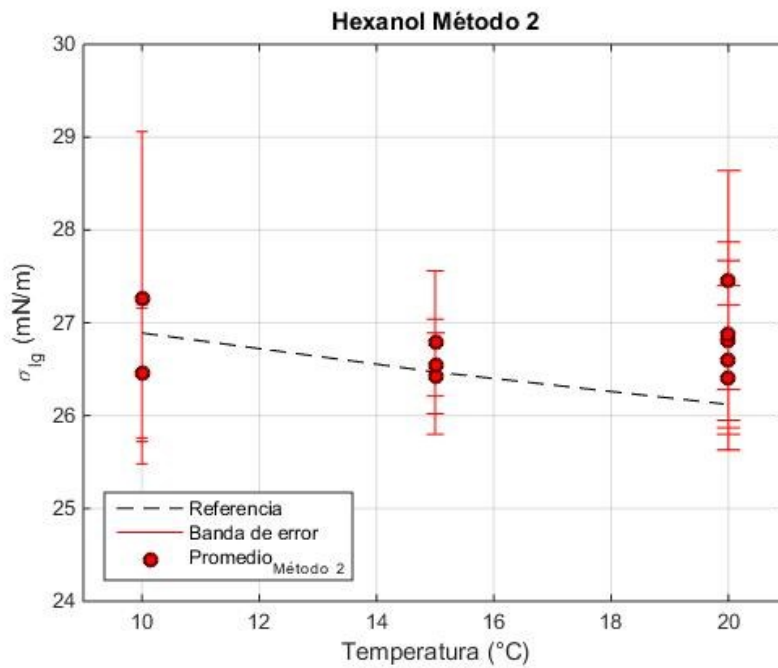
*¹Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 206,

*²Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 284,

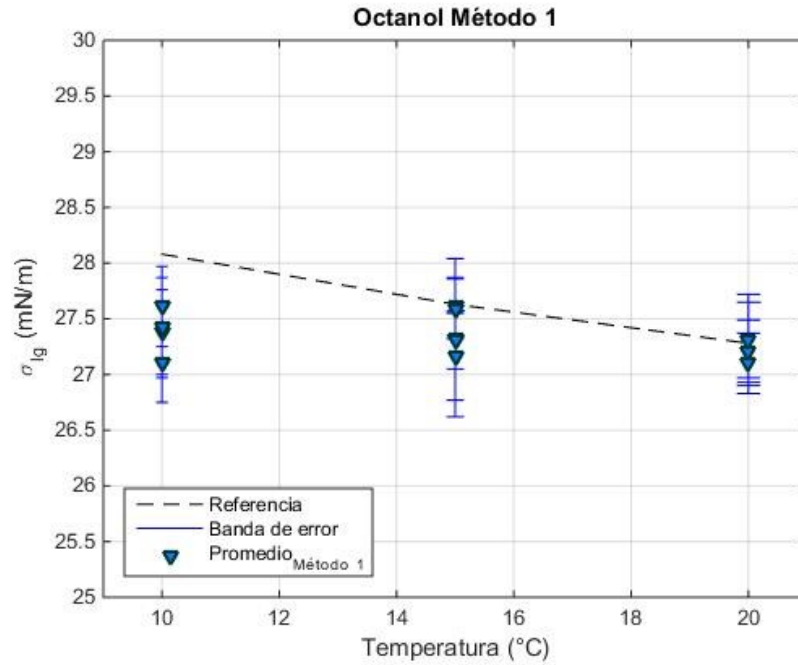
*³Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 340



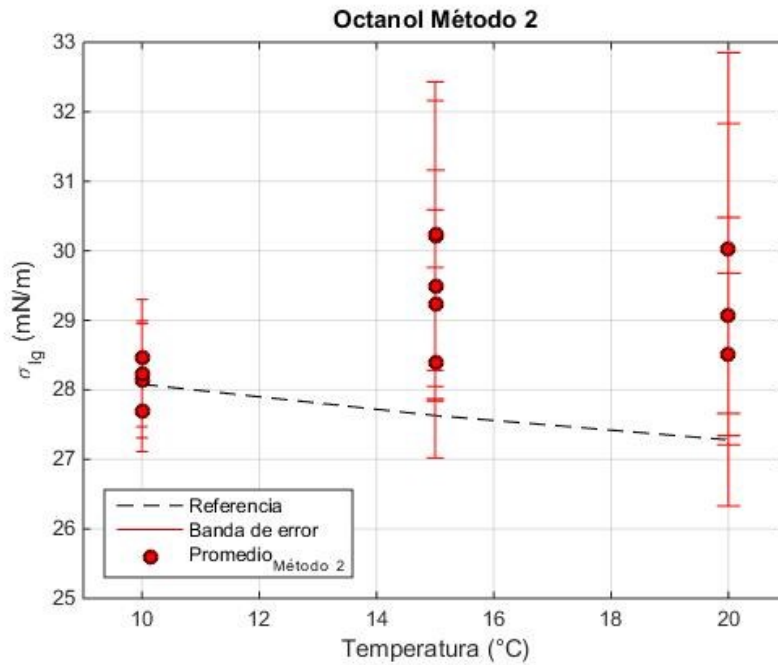
Gráfica 8.11 Promedios de la tensión superficial del hexanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 1



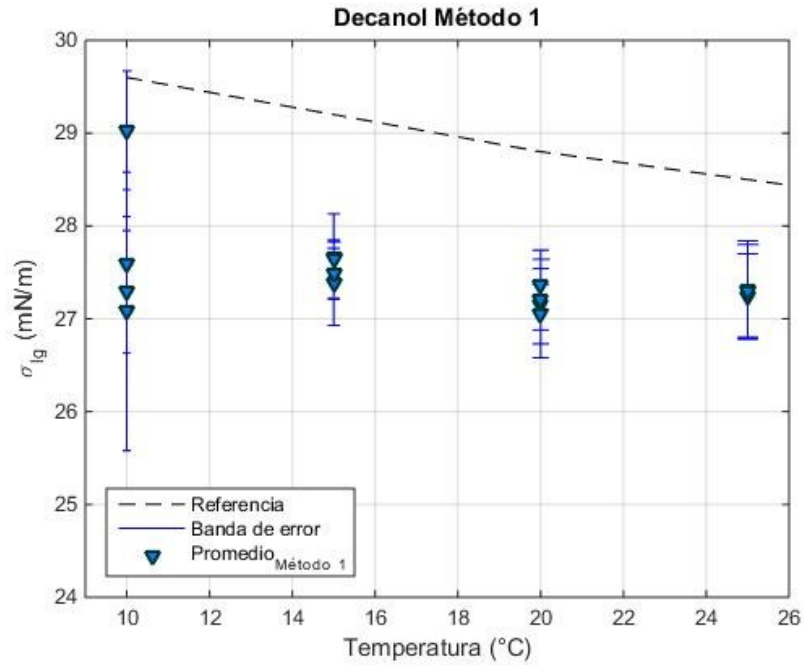
Gráfica 8.12 Promedios de la tensión superficial del hexanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 2



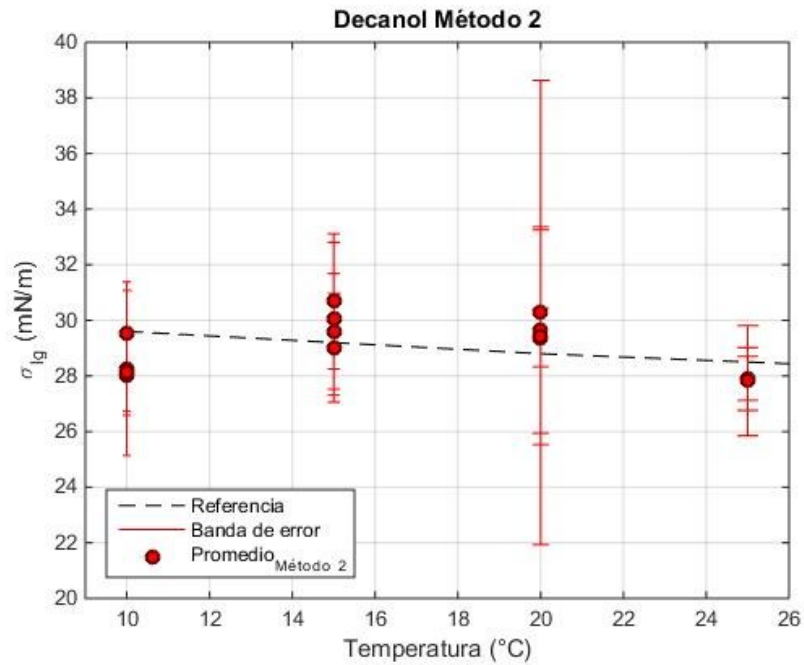
Gráfica 8.13 Promedios de la tensión superficial del octanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 1



Gráfica 8.14 Promedios de la tensión superficial del octanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 2



Gráfica 8.15 Promedios de la tensión superficial del decanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 1



Gráfica 8.16 Promedios de la tensión superficial del decanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 2

8.4.1 Soluciones electrolíticas

Los valores mostrados en esta sección corresponden a la densidad medida de soluciones de NaCl a diferentes concentraciones (ver Gráfica 8.17) y a los datos obtenidos de tensión superficial de soluciones de NaCl a diferentes concentraciones (ver Gráfica 8.18, Gráfica 8.19, Gráfica 8.20, Gráfica 8.21, Gráfica 8.22, Gráfica 8.23 y Gráfica 8.24) y soluciones 1.0 M de KCl y CaCl₂ (ver Tabla 8.6 y Tabla 8.7).

Tabla 8.6 Promedios de tensión superficial por experimento de soluciones de NaCl a diferentes concentraciones y soluciones de KCl y CaCl₂ 1.0 M a 25°C. (crecimiento de burbuja, C.B., tiempo de envejecimiento, T.E., luces del laboratorio encendidas, L.E). (1) Soluciones de NaCl elaboradas con el bote con No. de lote 71629, (2) Soluciones de NaCl elaboradas con el bote con No. de lote 71631

Solución electrolítica (25°C)	Metodología	No. de experimento	Promedio	Varianza	Desviación estándar	Promedio	Varianza	Desviación estándar	Con luces del laboratorio encendidas (X)
		Unidades	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	
		Cálculo	Método 1			Método 2			
NaCl 0.1M	Valor teórico calculado (25°C)		72.19* ¹			72.19* ¹			
	C.B.	1	69.32	0.72	0.85	68.70	38.08	1.17	X
		2	69.31	0.72	0.85	69.39	1.64	1.28	X
Promedio			69.31	0.72	0.85	69.05	19.86	3.73	

NaCl 0.1M	Valor teórico calculado (25°C)		72.19 ^{*1}			72.19 ^{*1}			
	C.B.	1	69.62	2.10	1.45	69.59	1.32	1.82	
		2	69.31	0.71	0.84	69.60	1.49	1.22	
		3	69.20	0.59	0.77	69.54	1.58	1.26	
		4	69.14	0.93	0.96	69.40	1.48	1.22	
		5	70.83	1.15	1.07	70.48	1.43	1.85	
Promedio			69.62	1.10	1.02	69.72	2.26	1.47	
NaCl 0.1M	Valor teórico calculado (25°C)		72.19 ^{*1}			72.19 ^{*1}			
	T.E.	1	69.14	0.98	0.99	69.32	2.01	1.42	
		2	68.92	0.85	0.92	69.17	1.56	1.25	
Promedio			69.03	0.92	0.96	69.25	1.79	1.33	
NaCl 0.2M	Valor teórico calculado (25°C)		72.4 ^{*1}			72.4 ^{*1}			
	C.B.	1	69.61	0.71	0.84	70.31	2.58	1.61	
		2	69.80	1.14	1.07	70.09	2.58	1.61	
		3	68.93	1.70	1.30	69.90	3.30	1.82	
		4	69.78	1.29	1.14	70.88	8.49	2.91	
		5	69.92	0.83	0.91	70.47	4.35	2.09	
Promedio			69.53	1.21	1.09	70.29	4.24	1.99	
NaCl 0.2M	Valor teórico calculado (25°C)		72.4 ^{*1}			72.4 ^{*1}			
	T.E.	1	69.56	0.99	0.99	70.47	2.33	1.53	
Promedio			69.56	0.99	0.99	70.47	2.33	1.53	

NaCl 0.4M	Valor teórico calculado (25°C)		72.82 ^{*1}			72.82 ^{*1}			
	C.B.	1	68.89	1.11	1.05	71.04	5.30	2.30	X
		2	68.80	0.95	0.98	70.80	4.41	2.10	X
		3	68.62	0.77	0.88	70.76	3.48	1.87	X
		4	68.77	0.75	0.86	70.79	3.78	1.95	X
		5	68.82	0.90	0.95	70.94	3.74	1.94	X
Promedio			68.77	0.89	0.94	70.85	4.24	2.05	
NaCl 0.4M	Valor teórico calculado (25°C)		72.82 ^{*1}			72.82 ^{*1}			
	T.E.	1	68.57	0.85	0.92	71.16	2.85	1.69	
		2	68.58	0.61	0.78	70.76	2.92	1.71	
Promedio			68.58	0.73	0.85	70.96	2.88	1.70	
NaCl 0.6M	Valor teórico calculado (25°C)		73.24 ^{*1}			73.24 ^{*1}			
	C.B.	1	71.41	1.31	1.14	70.58	3.04	1.74	X
		2	71.59	0.99	1.00	69.93	1.24	1.11	X
		3	70.92	0.70	0.84	70.87	1.85	1.36	X
		4	71.36	1.21	1.10	69.94	2.70	1.64	X
		5	71.32	1.34	1.16	70.36	1.67	1.29	X
Promedio			71.32	1.05	1.02	70.33	2.21	1.47	
NaCl 0.6M	Valor teórico calculado (25°C)		73.24 ^{*1}			73.24 ^{*1}			
	T.E.	1	70.76	0.79	0.89	70.73	1.16	1.08	
Promedio			70.76	0.79	0.89	70.73	1.16	1.08	

NaCl 0.8M (1)	Valor teórico calculado (25°C)		73.66 ^{*1}			73.66 ^{*1}			
	C.B.	1	70.31	0.77	0.88	70.49	1.97	1.40	X
		2	70.50	0.83	0.91	70.65	3.43	1.85	X
		3	70.47	0.86	0.93	70.85	3.19	1.79	X
		4	70.36	0.80	0.89	70.21	2.49	1.58	X
		5	70.38	0.65	0.81	70.64	2.66	1.63	X
		6	70.81	0.32	0.56	71.06	0.33	0.57	X
		7	70.82	0.41	0.64	71.00	0.31	0.56	X
Promedio			70.52	0.66	0.80	70.70	2.05	1.34	
NaCl 0.8 (1)	Valor teórico calculado (25°C)		73.66 ^{*1}			73.66 ^{*1}			
	T.E.	1	70.90	0.74	0.86	69.91	2.03	1.43	X
		2	70.84	0.62	0.79	70.66	0.30	0.55	X
Promedio			70.87	0.68	0.83	70.29	1.17	0.99	
NaCl 0.8 (1)	Valor teórico calculado (25°C)		73.66 ^{*1}			73.66 ^{*1}			
	C.B.	1	71.04	0.43	0.65	71.02	0.21	0.46	
		2	70.82	0.41	0.64	71.00	0.31	0.56	
Promedio			70.93	0.42	0.65	71.01	0.26	0.51	
NaCl 0.8 (1)	Valor teórico calculado (25°C)		73.66 ^{*1}			73.66 ^{*1}			
	T.E.	1	70.44	0.31	0.55	71.12	0.14	0.38	
		2	70.69	0.37	0.60	71.08	0.15	0.39	
Promedio			70.57	0.34	0.58	71.10	0.15	0.38	

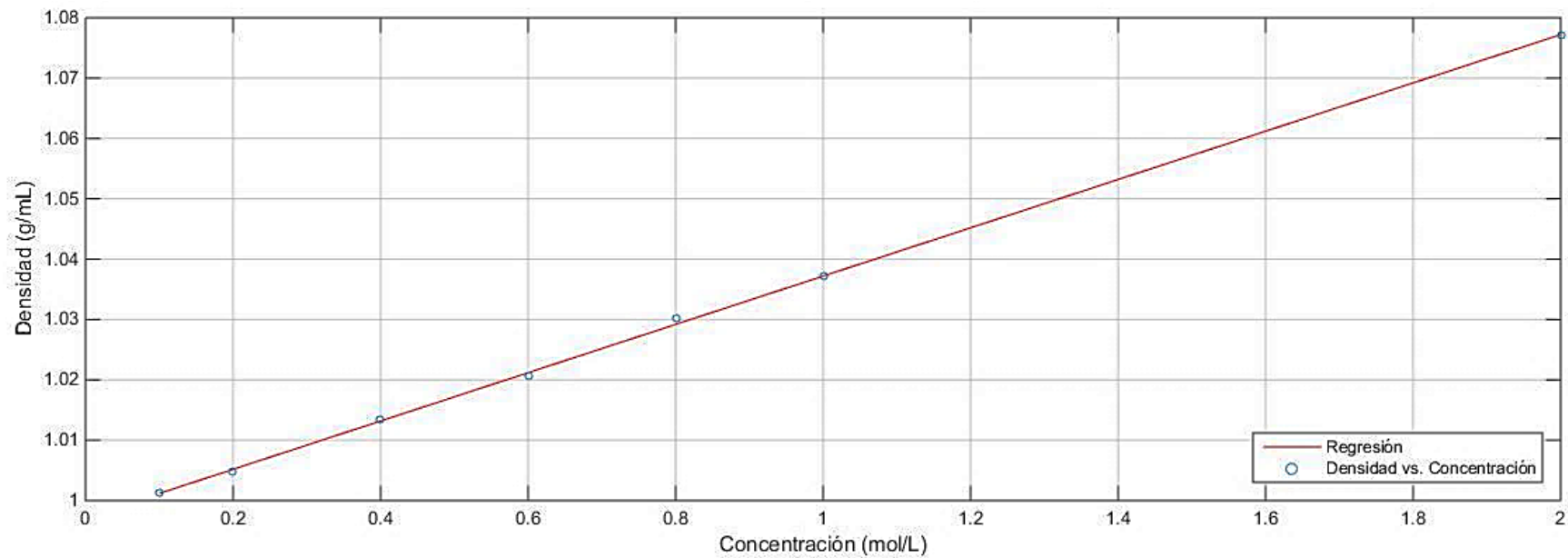
NaCl 0.8 (2)	Valor teórico calculado (25°C)		73.66 ^{*1}			73.66 ^{*1}			
	C.B.	1	69.74	5.53	2.35	70.50	1.32	1.15	
		2	70.36	4.24	2.06	71.33	3.37	1.84	
Promedio			70.05	4.89	2.21	70.92	2.35	1.49	
NaCl 0.8M (2)	Valor teórico calculado (25°C)		73.66 ^{*1}			73.66 ^{*1}			
	T.E.	1	71.26	0.52	0.72	72.36	0.88	0.94	
	Promedio			71.26	0.52	0.72	72.36	0.88	0.94
NaCl 1.0M (1)	Valor teórico calculado (25°C)		74.08 ^{*1}			74.08 ^{*1}			
	C.B.	1	70.82	1.26	1.12	70.37	0.90	0.95	X
		2	71.53	0.26	0.51	71.48	1.46	1.21	X
		3	71.26	1.28	1.13	70.45	2.23	1.49	X
		4	70.89	0.97	0.98	70.48	0.93	0.97	X
		5	70.51	0.99	0.99	70.03	1.68	1.30	X
Promedio			71.00	0.95	0.95	70.56	1.44	1.18	
NaCl 1.0M (1)	Valor teórico calculado (25°C)		74.08 ^{*1}			74.08 ^{*1}			
	C.B.	1	70.64	1.75	1.32	71.09	2.42	1.55	
		2	71.35	0.76	0.87	70.73	1.98	1.41	
		3	71.04	1.09	1.04	71.05	1.49	1.22	
		4	70.83	1.15	1.07	70.48	3.43	1.85	
Promedio			70.97	1.19	1.08	70.84	2.33	1.51	

NaCl 1.0M (1)	Valor teórico calculado (25°C)		74.08 ^{*1}			74.08 ^{*1}			
	T.E.	1	70.85	0.76	0.58	70.56	1.33	1.77	
		2	70.99	0.78	0.61	70.59	1.69	2.86	
Promedio			70.92	0.77	0.60	70.58	1.51	2.31	
NaCl 1.0M (2)	Valor teórico calculado (25°C)		74.08 ^{*1}			74.08 ^{*1}			
	C.B.	1	71.87	0.38	0.62	72.30	5.48	2.34	
		2	71.47	0.57	0.76	72.85	8.28	2.88	
		3	71.06	0.34	0.58	71.83	7.68	2.77	
Promedio			71.47	0.43	0.65	72.32	7.15	2.66	
NaCl 1.0M (2)	Valor teórico calculado (25°C)		74.08 ^{*1}			74.08 ^{*1}			
	C.B.	1	71.19	0.56	0.32	70.59	1.14	1.31	
Promedio			71.19	0.44	0.52	72.21	5.32	2.25	
NaCl 2.0M (2)	Valor teórico calculado (25°C)		76.18 ^{*1}			76.18 ^{*1}			
	C.B.	1	75.70	5.00	2.24	70.26	1.28	1.13	
		2	73.49	0.17	0.42	72.00	1.54	1.24	
		3	73.77	0.73	0.85	72.40	0.51	0.72	
Promedio			74.32	1.97	1.17	71.55	1.11	1.03	
NaCl 2.0M (2)	Valor teórico calculado (25°C)		76.18 ^{*1}			76.18 ^{*1}			
	T.E.	1	72.26	1.24	1.11	70.72	4.55	70.72	
Promedio			72.26	1.24	1.11	70.72	4.55	70.72	

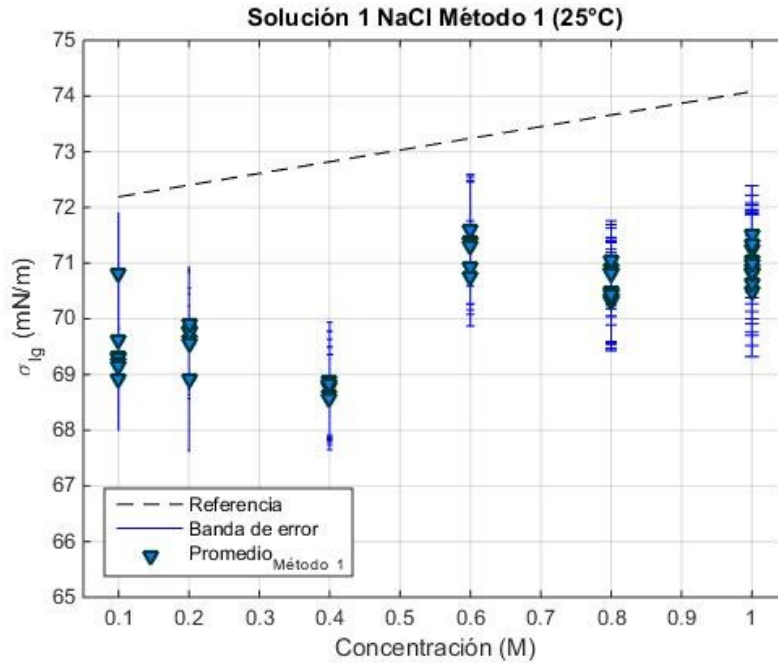
KCl 1.0M	Valor teórico calculado (25°C)		73.98 ^{*1}			73.98 ^{*1}			
	C.B.	1	70.90	1.14	1.07	73.15	0.31	0.55	
Promedio			70.90	1.14	1.07	73.15	0.31	0.55	
KCl 1.0M	Valor teórico calculado (25°C)		73.98 ^{*1}			73.98 ^{*1}			
	T.E.	1	70.67	2.16	1.47	69.76	4.20	2.05	
		2	70.51	0.60	0.77	72.43	0.39	0.62	
Promedio			70.59	1.38	1.12	71.09	2.30	1.34	
CaCl2 1.0M	Valor teórico calculado (25°C)		75.88 ^{*1}			75.88 ^{*1}			
	C.B.	1	72.04	0.64	0.80	72.48	0.32	0.56	
		2	72.17	2.56	1.60	71.36	0.49	0.70	
		3	72.34	2.09	1.44	71.47	2.85	1.69	
		4	72.26	2.43	1.56	71.31	0.35	0.59	
Promedio			72.20	1.93	1.35	71.66	1.00	0.89	
CaCl2 1.0M	Valor teórico calculado (25°C)		75.88 ^{*1}			75.88 ^{*1}			
	T.E.	1	71.85	1.42	1.19	71.67	1.84	1.36	
		2	70.65	0.93	0.96	70.50	1.10	1.05	
Promedio			71.25	1.17	1.08	71.08	1.47	1.20	

*1 El "valor teórico calculado" de tensión superficial de las soluciones electrolíticas se obtiene a partir de los *incrementos individuales de tensión superficial para iones acuosos*, k_i , de Marcus (2016) contenidos en la Tabla 6.1.

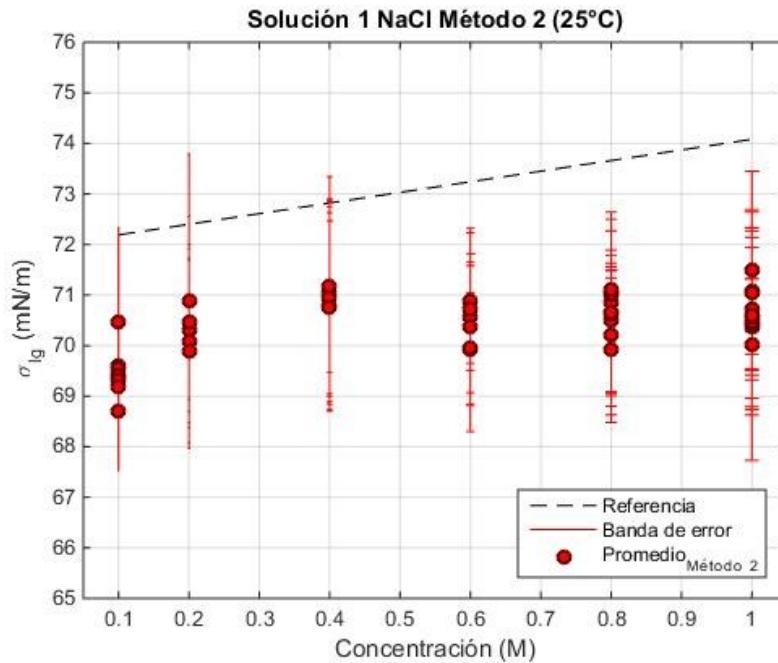
$$\text{Valor teórico calculado} = \text{Tensión superficial del agua} \left(\frac{mN}{m} \right) + \text{Conc. catión} (M) * \left(k_{\text{catión}} \left[\frac{\left(\frac{mN}{m} \right)}{(M)} \right] \right) + \text{Conc. Anión} (M) \left(k_{\text{Anión}} \left[\frac{\left(\frac{mN}{m} \right)}{(M)} \right] \right)$$



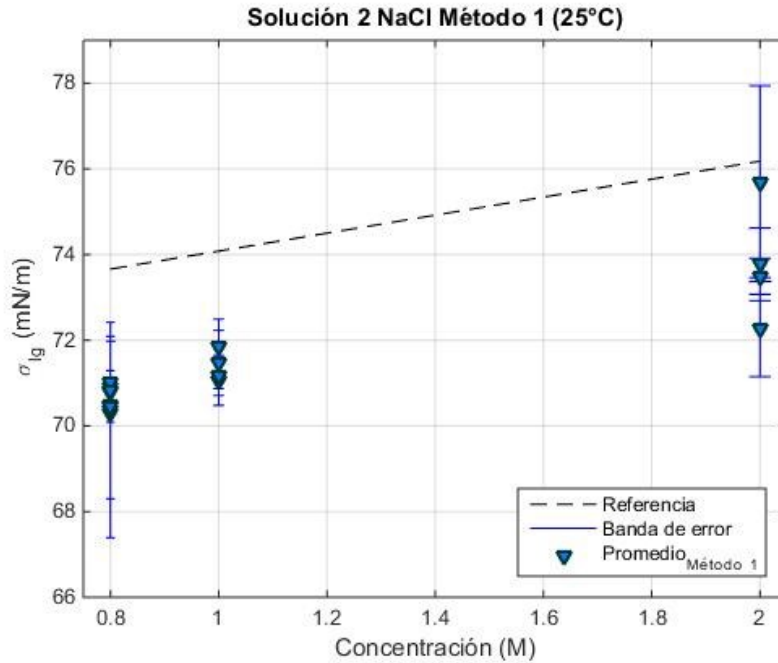
Gráfica 8.17 Densidad de soluciones de NaCl conforme a la concentración



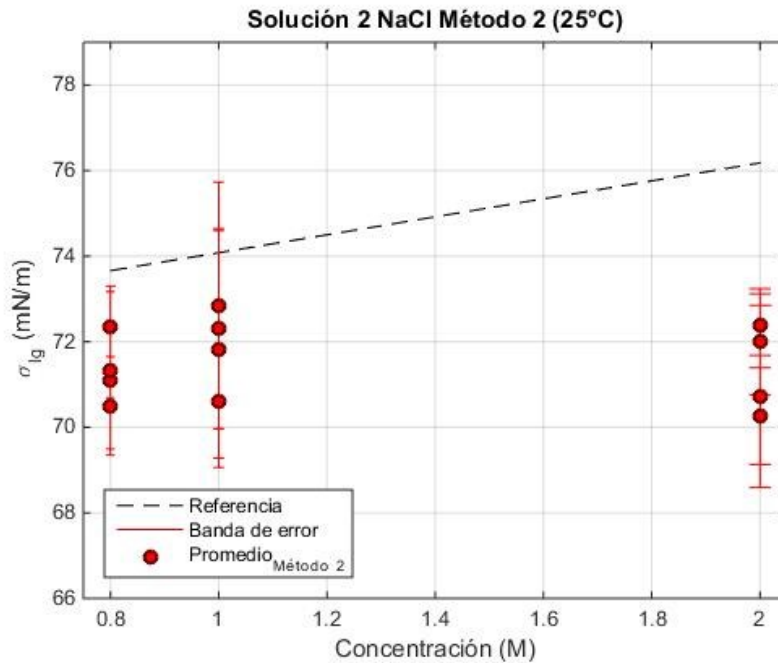
Gráfica 8.18 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución 1 de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 1



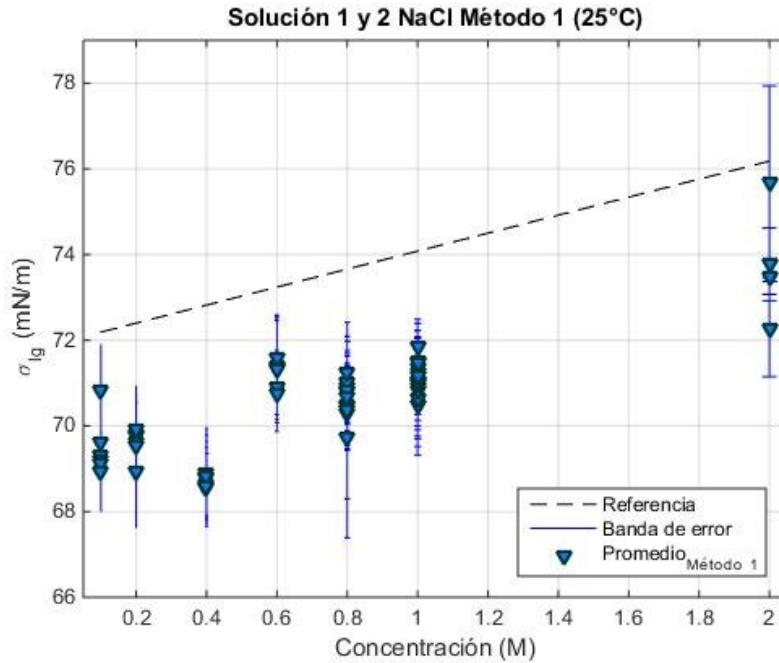
Gráfica 8.19 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución 1 de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 2



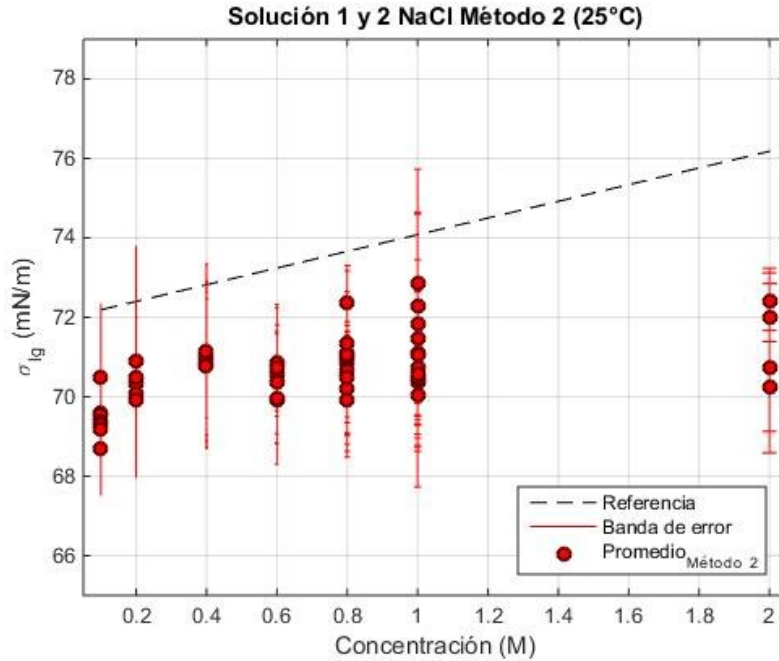
Gráfica 8.20 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución 2 de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 1



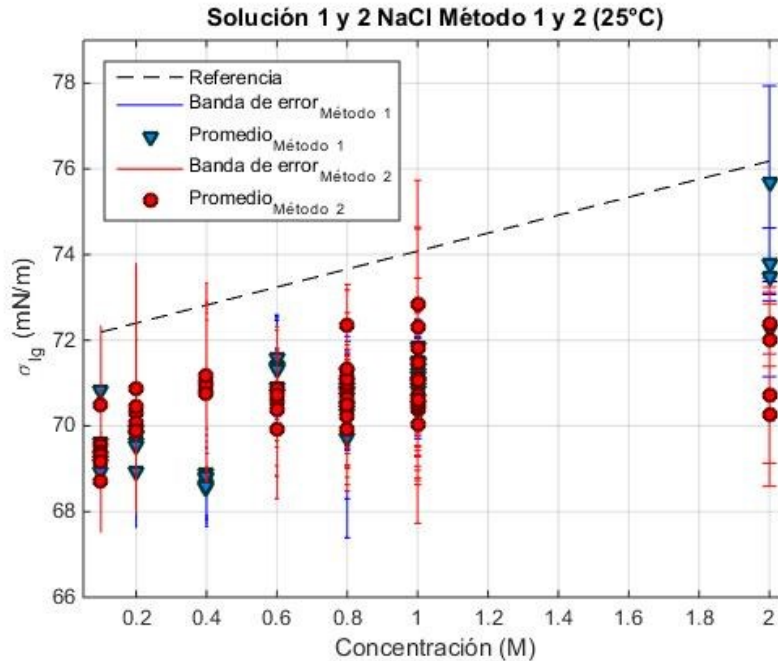
Gráfica 8.21 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución 2 de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 2



Gráfica 8.22 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución (1) y (2) de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 1



Gráfica 8.23 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución (1) y (2) de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 2



Gráfica 8.24 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución (1) y (2) de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 1 y el Método 2

Tabla 8.7 Promedio de la medición de tensión superficial de soluciones de NaCl, KCl y CaCl₂ a una concentración de 1.0 M mediante el método 1 y el método 2 mediante el crecimiento cuasi-estático de burbuja y tiempo de envejecimiento

Compuesto	Concentración / (M)	Método	Valor experimental	Valor teórico calculado (25°C)
			$\sigma_{lg} / (\text{mN/m})$	$\sigma_{lg} / (\text{mN/m})$
NaCl	1.0	1	71.10	74.08
		2	71.03	
KCl	1.0	1	70.66	73.98
		2	71.76	
CaCl ₂	1.0	1	71.90	75.88
		2	71.40	

Los valores teóricos calculados se calculan mediante la Tabla 6.1. El cambio de la tensión superficial conforme a la concentración, $d\sigma/dc$, para la solución 1.0 M de NaCl es 2.10 (mN/m)/mol, para el KCl es 2.00 (mN/m)/mol, y para el CaCl₂ es 3.90 (mN/m)/mol (Marcus, 2010)

Capítulo 9

Discusión

9.1 Construcción de la celda

El arreglo de la celda es de configuración compacta y sencilla. El tornillo micrométrico permite administrar con facilidad el flujo de aire deseado hacia la burbuja. Al montar la cámara fotográfica sobre un riel se facilita de manera considerable el ajuste y enfoque de la imagen. El uso del software, mediante el cual se tomaron las exposiciones, permite mejorar el tratamiento de imágenes a partir de los ajustes de imagen, permitiendo mejorar la definición de la forma de la burbuja.

Algunas de las consideraciones que no se habían tomado en cuenta y surgieron durante la experimentación fueron la alta sensibilidad del sistema a las vibraciones, al ángulo entre la lente de la cámara y la base de la burbuja, los cambios de presión dentro del laboratorio, corrientes de aire, el reflejo de la luz emitida por las luminarias del laboratorio sobre la superficie de la burbuja, la alineación de la luz y el uso de filtros entre la luz y la celda, el tipo de adhesivo a utilizar para sellar la celda, el sellado del sistema con el cual se administra el flujo de aire, las complicaciones en el lavado de la celda debido a la forma, la rugosidad de la base del capilar, la forma del orificio del capilar y la diferencia de temperatura entre el aire inyectado y el líquido a evaluar.

Factores que intervienen en la experimentación:

- a. **Los adhesivos:** Para sellar la cámara de la celda y la cámara del baño de agua, se utilizó en un principio un adhesivo para acrílico, pero este presentó fugas en la cámara del baño de agua hacia el exterior y al interior de la celda donde se contenía la sustancia a evaluar, principalmente en el área del lente de cuarzo. Posteriormente se utilizó silicón para altas temperaturas en el área de la lente de cuarzo, donde la fuga de agua era mayor. Este adhesivo tuvo mejores resultados, aunque al cabo de un tiempo se presentaron nuevamente fugas. La segunda desventaja del silicón para altas temperaturas es, probablemente, el disolvente con el cual está elaborado, dado que aún después de dejarlo secar durante poco más de 48 horas, este desprendía un olor a disolvente y se obtuvieron valores de tensión superficial del agua menores que con el esperado.

- b. **El ángulo del punto focal:** Al llevarse a cabo el tratamiento de las primeras imágenes y comparar estas con las imágenes de artículos publicados, se observó que las piernas de la burbuja antes de su desprendimiento, no se observaban del mismo modo que en las imágenes reportadas. Durante el tratamiento de datos había discrepancias entre los valores del método 1 y 2 y los valores del método 3, los cuales eran ampliamente dispersos. Cambiar ligeramente la configuración de la instrumentación, de manera que la celda estuviera aproximadamente 5 mm por debajo de su posición original, garantizó obtener una imagen completa de la burbuja y mejorar las mediciones.

- c. **Los cambios de presión:** La importancia de este factor se observó durante el método de tiempo de envejecimiento de una burbuja. Durante la experimentación se observaron oscilaciones verticales posteriores al abrir y cerrar la puerta del laboratorio. Esta perturbación se atribuyó a los cambios de presión dentro del laboratorio. Por tal motivo, se restringió la entrada y salida del laboratorio durante las mediciones y se consideró parte de la metodología.

- d. **Las corrientes de aire:** Al abrir la puerta del laboratorio y tener la ventana abierta, se esperaba que la perturbación en la burbuja fuera mínima, sin embargo, no se había tomado en cuenta que se producía, aunque ligera, una corriente de aire, lo cual perturbó el sistema. Por otro lado, se observó que al prender el sistema de ventilación del laboratorio también existía una perturbación en el sistema. Por tal motivo, mientras se llevaba a cabo la experimentación se mantuvo el laboratorio cerrado (puerta y ventanas), y el sistema de ventilación apagado. Aunado a esto se cubrió la parte superior de la celda con PARAFILM.
- e. **La forma del orificio del capilar:** Este factor modifica la forma de la burbuja tal y como se muestra en las Figura 9.2 y Figura 9.3. La primera figura muestra un orificio de capilar cónico y la segunda un orificio recto. Se optó por el segundo capilar debido a que representó mejor la forma de la burbuja esperada.
- f. **El lavado:** Los adhesivos utilizados para el sellado de la celda se despegaron paulatinamente con cada lavado aun cuando se utilizaba una esponja suave. La geometría rectangular de la celda forma ángulos rectos en la parte inferior-interna de la celda complicando el acceso, por lo cual no era posible asegurar que en la siguiente medición no hubiese trazas de la sustancia anterior, principalmente durante las determinaciones de la tensión superficial de alcoholes de cadena larga. Lavar la celda con un tensoactivo comercial de uso doméstico no retira los residuos de alcoholes de cadena larga, ya que aun después de varios lavados y dejar secar la celda por un tiempo de 24 horas se seguía percibiendo el aroma del alcohol utilizado. Los tensoactivos comerciales tienen, aparte de no poder retirar las trazas de alcoholes, la desventaja de quedar adheridos a la superficie de la celda, lo cual afecta a las mediciones posteriores. Los pares de tensoactivos para residuos persistentes del tipo catiónico y neutro retiran más eficientemente los residuos de alcoholes de cadena larga pero no por completo. Un lavado con peróxido de hidrógeno diluido tiene el fin de oxidar al alcohol hasta ácido carboxílico y de esta manera

aumentar su solubilidad en agua (Morrison y Boyd, 1998, p. 660), sin afectar la celda. Este procedimiento fue el más efectivo para retirar los residuos de alcoholes de cadena larga.

- g. **La luz:** Los brillos o sombras a causa de la incidencia de la luz sobre la burbuja es un factor determinante durante las mediciones. En primera instancia, las luces de las luminarias del laboratorio crean un reflejo en la parte superior de la burbuja, lo cual durante el tratamiento de imágenes dificulta la obtención del perfil de la burbuja. Utilizar un filtro para difuminar y homogeneizar la luz que incidía en la burbuja permitió mejorar la calidad del perfil de la burbuja. Hoorfar y W. Neumann (2006) afirman que el efecto óptico debido a la fuente de luz y la lente de la cámara tiene un gran impacto sobre la imagen, aún más que la resolución misma y recomiendan en su estudio el uso de un filtro azul para mejorar la calidad de la imagen. En este caso y para esta instrumentación, se encontró que un filtro blanco es el que más favorecía la calidad de imagen. La alineación adecuada de la luz por detrás de la burbuja disminuye las diferencias entre el perfil derecho e izquierdo de la burbuja. Cuando la luz no se encuentra bien alineada con la burbuja, el perfil izquierdo y derecho presentan diferencias en sus dimensiones.
- h. **La rugosidad de la base del capilar:** En las primeras experiencias se le aplicó a la parte superior del capilar una solución de silicón, pero durante las mediciones con agua, la base de la burbuja se desplazó sobre la superficie del capilar. Al aplicar un método abrasivo a la base del capilar (mediante lijas con diferentes tamaños de grano) hasta quedar lo más cercano al efecto espejo y colocar la solución de silicón (Reyes Sandoval, 2002), se obtuvo el mismo efecto. Al lavar el capilar y aplicar una ligera abrasión sobre la superficie con “lijas de agua” de menor tamaño de grano (de grano 400 a 2000), se evitó el desplazamiento de la burbuja sobre la superficie del capilar.

- i. **El sellado del sistema de flujo de aire:** Durante la experimentación de tiempo de envejecimiento se notó que la altura y el volumen de la burbuja disminuía de forma significativa por lo que se asumió que el sistema de flujo de aire no se encontraba sellado apropiadamente. En la parte del embolo de la jeringa se le aplicó una capa de cinta teflón lo cual aumentó su diámetro externo y mejoró el sellado. La conexión jeringa-manguera está conformada por tres partes, de la jeringa sale una manguera delgada que se introduce dentro de la manguera principal y desde la misma jeringa sale un capuchón de hule que cubre la manguera principal (ver Figura 9.1). En cada una de las conexiones se le aplicó de igual manera una capa de cinta teflón para aumentar el diámetro externo y por fuera del capuchón cinta de aislar para crear presión externa y mejorar el sellado. Conforme a la conexión manguera-capilar, se cubrió con vaselina la punta del capilar de vidrio. Esto facilita la conexión y desconexión, así como el sellado.

- j. **La temperatura:** Al encontrarse el aire inyectado dentro de la burbuja a una temperatura distinta a la del líquido, la burbuja tiende a contraerse si la temperatura del líquido es menor a la del aire y a expandirse rápidamente si la temperatura es mayor. Para resolver el problema, se alimentó el aire a la menor velocidad posible para disminuir, en lo posible, el gradiente de temperatura.

- k. **Las vibraciones:** Durante el tiempo de envejecimiento de la burbuja se observó que la burbuja oscilaba verticalmente al momento que se producía alguna vibración. Este efecto se observó principalmente cuando algún vehículo pesado circulaba por enfrente de las instalaciones hasta en acciones leves como caminar en el laboratorio o recargarse en la mesa de trabajo. Por tal motivo se determinó que el sistema es muy sensible a las vibraciones y se considera un factor de suma importancia. Las perturbaciones debidas a la vibración se minimizaron debido a que la mayoría de las mediciones se llevaron a cabo durante la noche o el fin de semana cuando el tránsito vehicular disminuye.

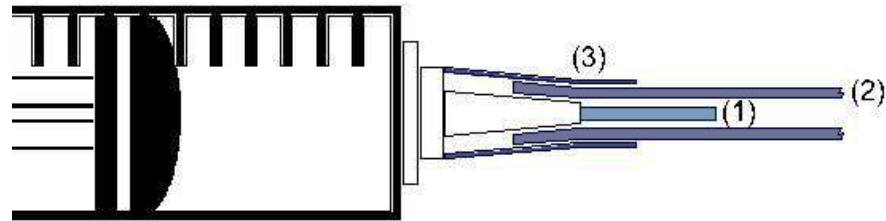


Figura 9.1 Sistema de sellado entre la jeringa y la manguera de hule, (1) manguera por donde fluye el aire desde la jeringa, (2) manguera de conexión entre la jeringa y el capilar, (3) capuchón de hule.



Figura 9.2 Imagen tomada en un ángulo diferente a 180° , con la luz del laboratorio encendida, sin ajustes en la toma de imagen, sin filtro y capilar con orificio de salida tipo cono y solución de silicón en su superficie sin pulir

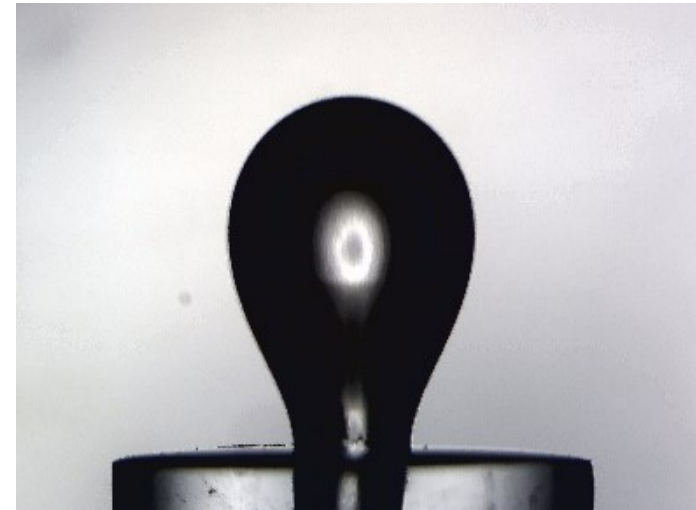


Figura 9.3 Imagen tomada en un ángulo aproximado a 180° , con la luz del laboratorio apagada, con ajustes en los parámetros de salida de imagen, con filtro y capilar con orificio de salida recto, sin solución de silicón en su superficie y superficie pulida

9.2 Programación

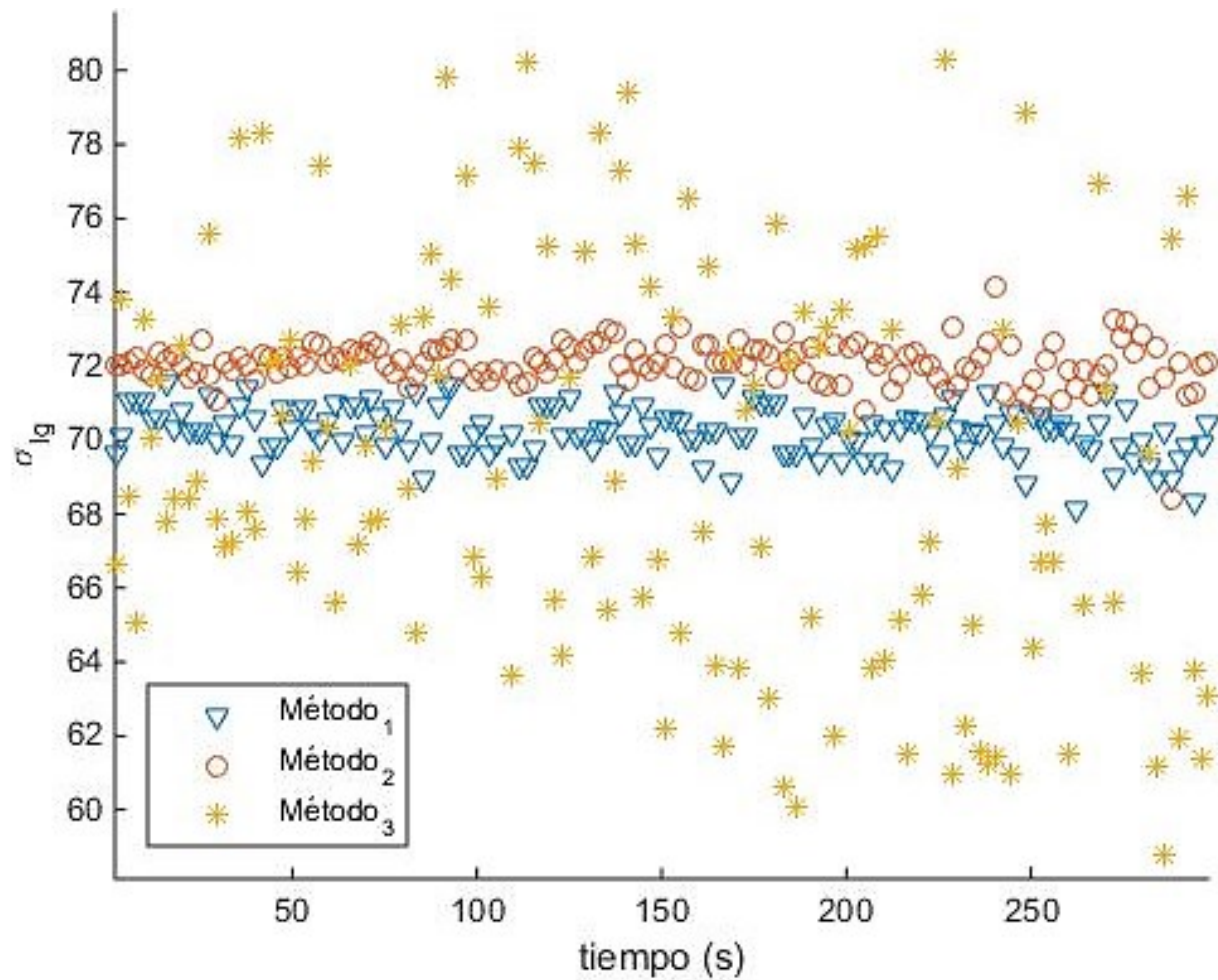
La programación es del tipo ADSA (ver Capítulo 5), donde a partir de una imagen se obtienen datos de tensión superficial. Mediante esta programación se buscó determinar la tensión superficial de los diferentes líquidos mediante tres métodos diferentes:

- Método 1: El primer método está basado en la adaptación a burbujas ascendentes elaborado por el Dr. Francisco Javier Garfias y Ayala (Sobol y col., 1976) sobre el método de gota pendiente propuesto por Andreas y col. (1937). La programación incluye la opción de utilizar tanto las tablas de Fordham (1948) como las de Roe y col. (1967) para el factor H utilizado dentro de la ecuación de Andreas y col. (1937). Este análisis se considera del tipo ADSA - D.
- Método 2: El segundo método busca resolver la ecuación de Young-Laplace a partir de los radios de curvatura en cada punto, o coordenada, sobre el perímetro de la burbuja, por lo cual este análisis se considera del tipo ADSA - P.
- Método 3: El tercer método es un arreglo de la ecuación planteada en el estudio de Vafaei y Wen (2015) donde la ecuación está basada en el equilibrio de las fuerzas que actúan sobre la burbuja y el tipo de análisis propuesto es una combinación del tipo ADSA-CP y ADSA-HD.

Mediante el Método 1 y el Método 2 se obtuvo una precisión similar en todos los casos sin importar el ángulo o los ajustes a la imagen (escala de grises o blanco y negro). El método 3 fue descartado para su análisis debido a su falta de precisión. Este método dio la pauta para mejorar el ángulo con el cual se llevaba a cabo la toma de imágenes. Al alinear el eje focal de la cámara con la base del capilar de manera adecuada disminuye notablemente la dispersión de los datos obtenidos mediante este método. Sin embargo, esta disminución en la dispersión de datos no fue suficiente como para tomarlo en cuenta en los resultados, tal y como se muestra en la Gráfica 9.1.

Al llevar a cabo una comparación entre el equipo *Attension theta-lite* y la programación, (ver Capítulo 8.2), el Método 1 queda como indeterminado debido a que los perfiles de burbuja y gota eran casi esféricos y la relación de diámetros **S** se encuentra fuera del rango de valores dentro de las tablas de Fordham (1948) y de Roe y col. (1967). Conforme al Método 2, hubo en las burbujas una diferencia en la tensión superficial de 0.014%, 0.000% y 0.014%, en el volumen de 1.4%, 2.3% y 2.0% y respecto al factor β del 2.1%, 4.0% y 5.4%. Conforme a la gota, la diferencia en la tensión superficial es de 0.000%, 0.000% y 0.000%, en el volumen de 2.3%, 3.3% y 7.2% y conforme al factor β de 5.9%, 3.1% y 5.5%. El método 3 por su parte tuvo desviaciones de la tensión superficial de 12.096%, 12.693% y 11.271% para las burbujas y 14.292%, 5.428% y 17.616% para las gotas pendientes.

El programa solo puede analizar una fotografía a la vez y es necesario ajustar de manera continua tanto el balance de blancos y negros, así como el punto donde se encuentra la base de la burbuja. La conversión de las imágenes en escala de grises a una imagen binaria depende del nivel en la escala de grises de cada pixel, donde todos los puntos que tengan una luminiscencia mayor al nivel establecido son remplazados con un valor de 1 (blanco) y el resto de los pixeles son remplazados por un valor igual a 0 (negro). La variación del valor del nivel a partir del cual se transforma la imagen de escala de grises a imagen binaria durante el análisis de las imágenes es aproximadamente de 5 puntos dentro de un rango de 250 puntos. La coordenada donde se sitúa la base de la burbuja puede variar hasta 10 pixeles, cuando la imagen es de una resolución de 1600x1200 pixeles por imagen y hasta 3 pixeles con una resolución de 800x600 pixeles, que equivale aproximadamente a 0.006mm/pixel y 0.012mm/pixel respectivamente. El número total de exposiciones tomadas fue de 24 515, de las cuales aproximadamente 20 000 fueron adecuadas para ser analizadas.



Gráfica 9.1 Visualización de las estimaciones de tensión superficial mediante los tres métodos propuestos en la experimentación 1 de KCL 1.0 M

9.3 Análisis de resultados

9.3.1 Agua

En la Tabla 9.1 el 70% de los valores obtenidos de las mediciones de tensión superficial de agua durante el mes de mayo, donde no se había ajustado el ángulo de medición, muestran valores menores que los reportados. El intervalo de las desviaciones en este periodo conforme al Método 1 es de 0.008% a 6.74% y para el Método 2 de 0.064% a 2.46%. Cabe destacar que la mayor desviación del Método 1 durante este periodo se dio a la temperatura de 25°C. Para las mediciones del mes de agosto el rango de las desviaciones para el Método 1 y el Método 2 es de 0.10% a 1.14% y de 0.068% a 2.32% respectivamente. Durante este periodo no se había implementado el filtro entre el haz la luz y la burbuja. Durante el mes de octubre el rango de desviación del Método 1 fue de 1.40% a 1.97% mientras que para el Método 2 fue de 0.006% a 0.92%. Durante estas mediciones se utilizó un filtro blanco y la luz del laboratorio se mantuvo apagada. Con base a los resultados obtenidos, el factor mediante el cual se obtuvo una mayor precisión de los datos fue la corrección del ángulo entre la lente de la cámara y la base de la burbuja. Conforme al tipo de exposición, la diferencia entre tomar una imagen en escala de grises o en blanco y negro no representa una diferencia notable al igual que la implementación de un filtro.

El rango del flujo de aire calculado durante las mediciones durante el periodo de mayo fue de 0.59 mL/h a 2.54 mL/h y en octubre de 6.25 mL/h a 6.53 mL/h y en agosto el promedio fue de 1.94 mL/h.

Tabla 9.1 Diferencia porcentual entre los valores experimentales de tensión superficial del agua a diferentes temperaturas y los valores de referencia (crecimiento de burbuja, C.B. y tiempo de envejecimiento, T.E.)

T (°C)	Metodología	No. de experimento	Promedio mediciones	Diferencia ($\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref}$)	Diferencia porcentual $\frac{(\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref})}{\sigma_{Ref}} * 100$	Promedio mediciones	Diferencia ($\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref}$)	Diferencia porcentual $\frac{(\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref})}{\sigma_{Ref}} * 100$	Tipo de fotografía
		Unidades	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	
		Cálculo	Método 1			Método 2			
Mayo-Junio									
10	Referencia		74.23* ¹			74.23* ¹			Gris
	C.B.	1	74.24 ± 0.67	0.006	0.008%	73.36 ± 1.77	-0.87	-1.18%	
		2	72.99 ± 1.09	-1.24	-1.68%	73.52 ± 1.36	-0.71	-0.96%	
		3	73.23 ± 1.05	-1.00	-1.35%	73.38 ± 1.49	-0.85	-1.14%	
		4	72.93 ± 1.45	-1.30	-1.75%	72.50 ± 3.32	-1.73	-2.33%	
	Promedio		73.35 ± 1.07	-0.88	-1.19%	73.19 ± 1.99	-1.04	-1.40%	
15	Referencia		73.49* ¹			74.23* ¹			Gris
	C.B.	1	73.56 ± 0.62	-0.67	-0.91%	72.76 ± 1.85	-1.47	-1.98%	
		2	74.06 ± 0.61	-0.17	-0.23%	73.61 ± 1.02	-0.62	-0.84%	
		3	73.69 ± 0.84	-0.54	-0.73%	73.54 ± 1.18	-0.69	-0.92%	
		4	75.11 ± 2.52	0.88	1.18%	74.34 ± 0.92	0.11	0.15%	
	Promedio		74.10 ± 1.15	-0.13	-0.17%	73.56 ± 1.24	-0.67	-0.90%	
20	Referencia		72.74* ¹			72.74* ¹			Gris
	C.B.	1	71.59 ± 0.97	-1.15	-1.58%	72.51 ± 0.90	-0.23	-0.31%	
		2	71.13 ± 1.19	-1.61	-2.21%	72.95 ± 3.20	0.21	0.28%	
		3	71.57 ± 0.97	-1.17	-1.61%	74.08 ± 4.32	1.34	1.84%	
		4	71.30 ± 0.92	-1.44	-1.98%	73.33 ± 3.73	0.59	0.81%	
	Promedio		71.40 ± 1.01	-1.34	-1.84%	73.22 ± 3.04	0.48	0.66%	

25	Referencia		71.98* ¹			71.98* ¹			
	C.B.	1	68.60 ± 0.59	-3.38	-4.70%	72.27 ± 1.66	0.29	0.41%	Gris
		2	68.15 ± 0.87	-3.83	-5.32%	71.73 ± 1.27	-0.25	-0.35%	
		3	67.46 ± 1.08	-4.52	-6.28%	71.79 ± 2.24	-0.19	-0.26%	
		4	67.13 ± 1.27	-4.85	-6.74%	70.81 ± 2.13	-1.17	-1.63%	
Promedio		67.83 ± 0.95	-4.15	-5.76%	71.65 ± 1.83	-0.33	-0.46%		
25	Referencia		71.98* ¹			71.98* ¹			
	T.E.	1	69.68 ± 0.97	-2.30	-3.20%	71.35 ± 1.86	-0.63	-0.88%	Gris
	Promedio		69.68 ± 0.97	-2.30	-3.20%	71.35 ± 1.86	-0.63	-0.88%	
25	Referencia		71.98* ¹			71.98* ¹			
	C.B.	1	67.91 ± 0.66	-4.07	-5.65%	72.30 ± 3.04	0.32	0.44%	Blanco y Negro
		2	67.76 ± 0.76	-4.22	-5.86%	71.19 ± 3.33	-0.79	-1.10%	
		3	67.15 ± 0.62	-4.83	-6.71%	72.59 ± 2.56	0.61	0.85%	
		4	67.66 ± 0.78	-4.32	-6.00%	72.03 ± 6.74	0.05	0.06%	
Promedio		67.62 ± 0.70	-4.36	-6.06%	72.03 ± 3.92	0.05	0.06%		
30	Referencia		71.19* ¹			71.19* ¹			
	C.B.	1	68.05 ± 1.01	-3.14	-4.41%	70.33 ± 1.06	-0.86	-1.21%	Gris
		2	68.17 ± 0.55	-3.02	-4.25%	70.13 ± 1.15	-1.06	-1.49%	
		3	68.50 ± 0.62	-2.69	-3.78%	70.43 ± 0.75	-0.76	-1.07%	
		4	67.95 ± 0.55	-3.24	-4.56%	69.44 ± 1.71	-1.75	-2.46%	
Promedio		68.16 ± 0.68	-3.03	-4.25%	70.08 ± 1.17	-1.11	-1.56%		

Agosto									
25	Referencia		71.98* ¹			71.98* ¹			Gris
	C.B.	1	72.29 ± 0.80	0.31	0.43%	71.04 ± 1.30	-0.94	-1.30%	
		2	72.07 ± 0.71	0.09	0.13%	71.81 ± 1.14	-0.17	-0.24%	
		3	72.05 ± 0.98	0.07	0.10%	72.54 ± 0.98	0.56	0.78%	
		4	72.35 ± 1.07	0.37	0.51%	73.08 ± 1.89	1.10	1.53%	
		5	72.80 ± 0.67	0.82	1.14%	70.31 ± 2.03	-1.67	-2.32%	
		6	72.27 ± 0.95	0.29	0.40%	71.84 ± 1.20	-0.14	-0.20%	
		7	72.17 ± 0.83	0.19	0.27%	71.93 ± 1.12	-0.05	-0.07%	
Promedio		72.29 ± 0.86	0.31	0.42%	71.79 ± 1.38	-0.19	-0.26%		
Octubre									
25	Referencia		71.98* ¹			71.98* ¹			Gris
	C.B.	1	70.98 ± 0.71	-1.00	-1.40%	71.32 ± 0.93	-0.66	-0.92%	
		2	70.85 ± 0.71	-1.13	-1.57%	71.98 ± 0.88	0.00	-0.01%	
Promedio		70.91 ± 0.71	-1.07	-1.48%	71.65 ± 0.91	-0.33	-0.46%		
25	Referencia		71.98* ¹			71.98* ¹			Gris
	T.E.	1	70.56 ± 0.68	-1.42	-1.97%	72.01 ± 1.17	0.03	0.04%	
Promedio		70.56 ± 0.68	-1.42	-1.97%	72.01 ± 1.17	0.03	0.04%		

*¹Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 23.

9.3.1 Alcoholes

La medición de tensión superficial de octanol y decanol se llevó a cabo durante el periodo de mayo, y el de hexanol durante el mes de noviembre, siendo este último el único al cual se le aplicó la corrección del ángulo formado entre el eje focal de la cámara y el capilar.

Tabla 9.2 Diferencia porcentual entre los valores experimentales promedio de tensión superficial de hexanol, octanol y decanol a diferentes temperaturas y los valores de referencia

T (°C)	Metodología	No. de experimento	Promedio mediciones	Diferencia ($\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref}$)	Diferencia porcentual $\frac{(\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref})}{\sigma_{Ref}} * 100$	Promedio mediciones	Diferencia ($\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref}$)	Diferencia porcentual $\frac{(\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref})}{\sigma_{Ref}} * 100$
		Unidades	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)	(mN/m)
		Cálculo	Método 1			Método 2		
Hexanol								
10	Referencia		26.89 ^{*1}			26.89 ^{*1}		
	C.B.	1	26.36 ± 0.33	-0.53	-1.99%	26.46 ± 0.70	-0.43	-1.62%
		2	27.10 ± 0.29	0.21	0.76%	27.27 ± 1.79	0.38	1.42%
		3	27.01 ± 0.42	0.12	0.43%	26.46 ± 0.74	-0.43	-1.59%
	Promedio		26.82 ± 0.35	-0.07	-0.26%	26.73 ± 1.08	-0.16	-0.60%
15	Referencia		26.47 ^{*1}			26.47 ^{*1}		
	C.B.	1	26.23 ± 0.43	-0.24	-0.90%	26.42 ± 0.62	-0.05	-0.21%
		2	26.74 ± 0.53	0.27	1.03%	26.79 ± 0.77	0.32	1.20%
		3	27.14 ± 0.21	0.67	2.52%	26.55 ± 0.34	0.08	0.29%
	Promedio		26.70 ± 0.39	0.23	0.88%	26.58 ± 0.58	0.11	0.43%

20	Referencia		26.12* ¹			26.12* ¹		
	C.B.	1	25.56 ± 0.32	-0.56	-2.14%	26.41 ± 0.78	0.29	1.10%
		2	26.67 ± 0.49	0.55	2.09%	26.60 ± 0.80	0.48	1.84%
		3	27.06 ± 0.24	0.94	3.60%	26.81 ± 0.86	0.69	2.64%
		4	26.70 ± 0.53	0.58	2.22%	26.87 ± 1.00	0.75	2.85%
		5	26.93 ± 0.19	0.81	3.09%	27.46 ± 1.18	1.34	5.13%
Promedio		26.58 ± 0.35	0.46	1.77%	26.83 ± 0.92	0.71	2.71%	
Octanol								
10	Referencia		28.08* ²			28.08* ²		
	C.B.	1	27.38 ± 0.38	-0.70	-2.49%	28.13 ± 0.82	0.05	0.17%
		2	27.61 ± 0.36	-0.47	-1.68%	28.47 ± 0.83	0.39	1.39%
		3	27.42 ± 0.45	-0.66	-2.34%	28.23 ± 0.76	0.15	0.52%
		4	27.10 ± 0.35	-0.98	-3.50%	27.69 ± 0.58	-0.39	-1.40%
Promedio		27.38 ± 0.38	-0.70	-2.50%	28.13 ± 0.75	0.05	0.17%	
15	Referencia		27.63* ²			27.63* ²		
	C.B.	1	27.33 ± 0.71	-0.30	-1.10%	28.39 ± 1.37	0.76	2.76%
		2	27.16 ± 0.39	-0.47	-1.70%	29.23 ± 1.36	1.60	5.78%
		3	27.61 ± 0.26	-0.02	-0.06%	30.22 ± 1.94	2.59	9.38%
		4	27.59 ± 0.27	-0.04	-0.16%	30.24 ± 2.19	2.61	9.45%
		5	27.31 ± 0.26	-0.32	-1.14%	29.50 ± 1.66	1.87	6.75%
Promedio		27.40 ± 0.38	-0.23	-0.83%	29.52 ± 1.71	1.89	6.82%	
20	Referencia		27.28* ²			27.28* ²		
	C.B.	1	27.10 ± 0.27	-0.98	-3.48%	29.07 ± 1.41	0.99	3.51%
		2	27.31 ± 0.41	-0.77	-2.73%	30.03 ± 2.82	1.95	6.94%
		3	27.21 ± 0.28	-0.87	-3.09%	29.08 ± 2.75	1.00	3.58%
		4	27.31 ± 0.34	-0.77	-2.75%	28.51 ± 1.17	0.43	1.52%
Promedio		27.23 ± 0.32	-0.85	-3.01%	29.17 ± 2.04	1.09	3.89%	

Decanol								
10	Referencia		29.60 ^{*3}			29.60 ^{*3}		
	C.B.	1	27.60 ± 0.50	-2.00	-6.77%	28.03 ± 1.44	-1.57	-5.32%
		2	27.08 ± 1.50	-2.52	-8.51%	28.26 ± 3.12	-1.34	-4.53%
		3	27.29 ± 0.66	-2.31	-7.81%	28.14 ± 1.40	-1.46	-4.95%
		4	29.03 ± 0.64	-0.57	-1.93%	29.52 ± 1.56	-0.08	-0.27%
Promedio		27.75 ± 0.82	-1.85	-6.25%	28.49 ± 1.88	-1.11	-3.76%	
15	Referencia		sin dato			sin dato		
	C.B.	1	27.39 ± 0.46			30.06 ^{*3} ± 2.75		
		2	27.67 ± 0.46			30.68 ± 2.43		
		3	27.49 ± 0.27			29.60 ± 2.08		
		4	27.64 ± 0.19			29.01 ± 1.95		
Promedio		27.55 ± 0.35			29.84 ± 2.30			
20	Referencia		28.80 ^{*3}			28.80 ^{*3}		
	C.B.	1	27.16 ± 0.58	-1.64	-5.69%	29.38 ± 1.05	0.58	2.01%
		2	27.05 ± 0.32	-1.75	-6.07%	29.65 ± 3.71	0.85	2.96%
		3	27.21 ± 0.33	-1.59	-5.51%	29.39 ± 3.86	0.59	2.06%
		4	27.37 ± 0.27	-1.43	-4.95%	30.28 ± 0.84	1.48	5.15%
Promedio		27.20 ± 0.37	-1.60	-5.55%	29.68 ± 2.36	0.88	3.05%	
25	Referencia		sin dato			sin dato		
	C.B.	1	27.32 ± 0.52			27.91 ± 0.79		
		2	27.24 ± 0.46			27.89 ± 1.13		
		3	27.29 ± 0.51			27.83 ± 1.98		
Promedio		27.28 ± 0.50			27.88 ± 1.30			

*¹Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 206,

*²Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 284,

*³Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 340

Tabla 9.3 Diferencia porcentual absoluta mínima y máxima entre los valores experimentales de tensión superficial de octanol y decanol a diferentes temperaturas y los valores de referencia.

Alcohol	T (°C)	Desviación	Método 1	Método 2
Hexanol	10	Mínima	0.26%	0.60%
		Máxima	1.99%	1.62%
	15	Mínima	0.88%	0.21%
		Máxima	2.52%	1.20%
	20	Mínima	1.77%	1.10%
		Máxima	3.60%	5.13%
Octanol	10	Mínima	1.68%	0.17%
		Máxima	3.50%	1.40%
	15	Mínima	0.06%	2.76%
		Máxima	1.70%	9.45%
	20	Mínima	2.73%	1.52%
		Máxima	3.48%	6.94%
Decanol	10	Mínima	1.93%	0.27%
		Máxima	8.51%	5.32%
	20	Mínima	4.95%	2.01%
		Máxima	6.07%	5.15%

En a Tabla 9.3 se puede observar que la desviación porcentual promedio del hexanol es menor a las experimentaciones llevadas a cabo con el octanol y el decanol, lo cual se debe a la corrección de ángulo entre el eje focal de la cámara y la base del capilar.

El flujo mínimo de aire calculado para las mediciones de hexanol fue de 2.66 mL/h y un máximo de 4.27 mL/h, mientras que para el octanol fue entre 0.88 mL/h y 1.81 mL/h y para el decanol el flujo fue de aire calculado fue entre 0.46 mL/h y 3.01 mL/h.

9.3.2 Soluciones electrolíticas

En esta sección se evaluó la influencia que tiene la luz que incidente sobre la superficie de la burbuja durante las mediciones, así como la contribución de los electrolitos en disolución a la tensión superficial. Conforme a los datos experimentales y teóricos de autores como Marcus, (2016) Slavchov y Novev (2012) y Yuan y col. (2018) se esperaba que la tensión superficial de las soluciones electrolíticas fuera mayor a la del agua, sin embargo, la tensión superficial resultante en todos los casos, sin importar la concentración o el tipo de electrolito, fue menor a la del agua.

Tabla 9.4 Diferencia porcentual entre la tensión superficial de soluciones electrolíticas y la referencia calculada mediante tablas

Solución electrolítica (25°C)	Metodología	No. de experimento	Promedio mediciones	Diferencia ($\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref}$)	Diferencia porcentual $\frac{(\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref})}{\sigma_{Ref}} * 100$	Promedio mediciones	Diferencia ($\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref}$)	Diferencia porcentual $\frac{(\sigma_{Exp} - \sigma_{Ref})}{\sigma_{Ref}} * 100$	Luz del laboratorio encendida (X)
		Unidades	(mN/m)	(mN/m)		(mN/m)	(mN/m)		
		Cálculo	Método 1			Método 2			
NaCl 0.1M (1)		Valor teórico calculado (25°C)	72.19 ^{*1}			72.19 ^{*1}			
	C.B.	1	69.32 ± 0.85	-2.872	-3.98%	68.70 ± 6.17	-3.49	-4.83%	X
		2	69.31 ± 0.85	-2.88	-3.99%	69.39 ± 1.28	-2.80	-3.88%	X
		Promedio	69.31 ± 0.85	-2.88	-3.98%	69.05 ± 3.73	-3.14	-4.35%	
	C.B.	1	69.62 ± 1.45	-2.57	-3.55%	69.59 ± 1.82	-2.60	-3.60%	
		2	69.31 ± 0.84	-2.88	-3.99%	69.60 ± 1.22	-2.59	-3.59%	
		3	69.20 ± 0.77	-2.99	-4.14%	69.54 ± 1.26	-2.65	-3.67%	
		4	69.14 ± 0.96	-3.05	-4.22%	69.40 ± 1.22	-2.79	-3.86%	
		5	70.83 ± 1.07	-1.36	-1.89%	70.48 ± 1.85	-1.71	-2.37%	
		Promedio	69.62 ± 1.02	-2.57	-3.56%	69.72 ± 1.47	-2.47	-3.42%	

NaCl 0.1M (1)	T.E.	1	69.14 ± 0.99	-3.05	-4.22%	69.32 ± 1.42	-2.87	-3.97%	
		2	68.92 ± 0.92	-3.27	-4.53%	69.17 ± 1.25	-3.02	-4.18%	
	Promedio		69.03 ± 0.96	-3.16	-4.37%	69.25 ± 1.33	-2.94	-4.07%	
NaCl 0.2M (1)	Valor teórico calculado (25°C)		72.40 ^{*1}			72.40 ^{*1}			
	C.B.	1	69.61 ± 0.84	-2.79	-3.86%	70.31 ± 1.61	-2.09	-2.88%	
		2	69.80 ± 1.07	-2.60	-3.59%	70.09 ± 1.61	-2.31	-3.20%	
		3	68.93 ± 1.30	-3.47	-4.80%	69.90 ± 1.82	-2.50	-3.46%	
		4	69.78 ± 1.14	-2.62	-3.61%	70.88 ± 2.91	-1.52	-2.10%	
		5	69.92 ± 0.91	-2.48	-3.43%	70.47 ± 2.09	-1.93	-2.67%	
	Promedio		69.61 ± 1.05	-2.79	-3.86%	70.33 ± 2.01	-2.07	-2.86%	
	T.E.	1	69.56 ± 0.99	-2.84	-3.92%	70.47 ± 1.53	-1.93	-2.67%	
Promedio		69.56 ± 0.99	-2.84	-3.92%	70.47 ± 1.53	-1.93	-2.67%		
NaCl 0.4M (1)	Valor teórico calculado (25°C)		72.82 ^{*1}			72.82 ^{*1}			
	C.B.	1	68.89 ± 1.05	-3.93	-5.39%	71.04 ± 2.30	-1.78	-2.45%	X
		2	68.80 ± 0.98	-4.02	-5.52%	70.80 ± 2.10	-2.02	-2.77%	X
		3	68.62 ± 0.88	-4.20	-5.77%	70.76 ± 1.87	-2.06	-2.83%	X
		4	68.77 ± 0.86	-4.05	-5.56%	70.79 ± 1.95	-2.03	-2.79%	X
		5	68.82 ± 0.95	-4.00	-5.49%	70.94 ± 1.94	-1.88	-2.58%	X
	Promedio		68.78 ± 0.94	-4.04	-5.55%	70.87 ± 2.03	-1.95	-2.68%	
	T.E.	1	68.57 ± 0.92	-4.25	-5.83%	71.16 ± 1.69	-1.66	-2.28%	
		2	68.58 ± 0.78	-4.24	-5.82%	70.76 ± 1.71	-2.06	-2.83%	
Promedio		68.58 ± 0.85	-4.24	-5.83%	70.96 ± 1.70	-1.86	-2.55%		

NaCl 0.6M (1)	Valor teórico calculado (25°C)		73.24 ^{*1}			73.24 ^{*1}			
	C.B.	1	71.41 ± 1.14	-1.83	-2.50%	70.58 ± 1.74	-2.66	-3.64%	X
		2	71.59 ± 1.00	-1.65	-2.26%	69.93 ± 1.11	-3.31	-4.52%	X
		3	70.92 ± 0.84	-2.32	-3.17%	70.87 ± 1.36	-2.37	-3.23%	X
		4	71.36 ± 1.10	-1.88	-2.57%	69.94 ± 1.64	-3.30	-4.51%	X
		5	71.32 ± 1.16	-1.92	-2.62%	70.36 ± 1.29	-2.88	-3.93%	X
	Promedio		71.32 ± 1.05	-1.92	-2.62%	70.34 ± 1.43	-2.90	-3.97%	
	T.E.	1	70.76 ± 0.89	-2.48	-3.38%	70.73 ± 1.08	-2.51	-3.42%	
Promedio		70.76 ± 0.89	-2.48	-3.38%	70.73 ± 1.08	-2.51	-3.42%		
NaCl 0.8M (1)	Valor teórico calculado (25°C)		73.66 ^{*1}			73.66 ^{*1}			
	C.B.	1	70.31 ± 0.88	-3.35	-4.54%	70.49 ± 1.40	-3.17	-4.30%	X
		2	70.50 ± 0.91	-3.16	-4.30%	70.65 ± 1.85	-3.01	-4.08%	X
		3	70.47 ± 0.93	-3.19	-4.33%	70.85 ± 1.79	-2.81	-3.81%	X
		4	70.36 ± 0.89	-3.30	-4.49%	70.21 ± 1.58	-3.45	-4.68%	X
		5	70.38 ± 0.81	-3.28	-4.45%	70.64 ± 1.63	-3.02	-4.10%	X
		6	70.81 ± 0.56	-2.85	-3.87%	71.06 ± 0.57	-2.60	-3.53%	X
		7	70.82 ± 0.64	-2.84	-3.86%	71.00 ± 0.56	-2.66	-3.61%	X
	Promedio		70.52 ± 0.80	-3.14	-4.26%	70.70 ± 1.34	-2.96	-4.02%	
	T.E.	1	70.90 ± 0.86	-2.76	-3.74%	69.91 ± 1.43	-3.75	-5.09%	X
		2	70.84 ± 0.79	-2.82	-3.83%	70.66 ± 0.55	-3.00	-4.07%	X
	Promedio		70.87 ± 0.83	-2.79	-3.78%	70.29 ± 0.99	-3.37	-4.58%	
	C.B.	1	71.04 ± 0.65	-2.62	-3.56%	71.02 ± 0.46	-2.64	-3.59%	
		2	70.82 ± 0.64	-2.84	-3.86%	71.00 ± 0.56	-2.66	-3.61%	
	Promedio		70.93 ± 0.65	-2.73	-3.71%	71.01 ± 0.51	-2.65	-3.60%	
T.E.	1	70.44 ± 0.55	-3.22	-4.37%	71.12 ± 0.38	-2.54	-3.45%		
	2	70.69 ± 0.60	-2.97	-4.03%	71.08 ± 0.39	-2.58	-3.50%		
Promedio		70.57 ± 0.58	-3.09	-4.20%	71.10 ± 0.38	-2.56	-3.47%		

NaCl 0.8M (2)	Valor teórico calculado (25°C)		73.66 ^{*1}			73.66 ^{*1}			
	C.B.	1	69.74 ± 2.35	-3.92	-5.33%	70.50 ± 1.15	-3.16	-4.29%	
		2	70.36 ± 2.06	-3.30	-4.48%	71.33 ± 1.84	-2.33	-3.16%	
	Promedio		70.05 ± 2.21	-3.61	-4.90%	70.92 ± 1.49	-2.74	-3.72%	
	T.E.	1	71.26 ± 0.72	-2.40	-3.25%	72.36 ± 0.94	-1.30	-1.77%	
		Promedio		71.26 ± 0.72	-2.40	-3.25%	72.36 ± 0.94	-1.30	-1.77%
NaCl 1.0M (1)	Valor teórico calculado (25°C)		74.08 ^{*1}			74.08 ^{*1}			
	C.B.	1	70.82 ± 1.12	-3.26	-4.40%	70.37 ± 0.95	-3.71	-5.00%	X
		2	71.53 ± 0.51	-2.55	-3.44%	71.48 ± 1.21	-2.60	-3.50%	X
		3	71.26 ± 1.13	-2.82	-3.81%	70.45 ± 1.49	-3.63	-4.90%	X
		4	70.89 ± 0.98	-3.19	-4.31%	70.48 ± 0.97	-3.60	-4.86%	X
		5	70.51 ± 0.99	-3.57	-4.82%	70.03 ± 1.30	-4.05	-5.47%	X
	Promedio		71.00 ± 0.95	-3.08	-4.15%	70.56 ± 1.18	-3.52	-4.75%	
	C.B.	1	70.64 ± 1.32	-3.44	-4.65%	71.09 ± 1.55	-2.99	-4.04%	
		2	71.35 ± 0.87	-2.73	-3.69%	70.73 ± 1.41	-3.35	-4.52%	
		3	71.04 ± 1.04	-3.04	-4.10%	71.05 ± 1.22	-3.03	-4.09%	
		4	70.83 ± 1.07	-3.25	-4.39%	70.48 ± 1.85	-3.60	-4.86%	
	Promedio		70.97 ± 1.08	-3.11	-4.20%	70.84 ± 1.51	-3.24	-4.38%	
	T.E.	1	70.85 ± 0.58	-3.23	-4.36%	70.56 ± 1.77	-3.52	-4.75%	
		2	70.99 ± 0.61	-3.09	-4.17%	70.59 ± 2.86	-3.49	-4.71%	
Promedio		70.92 ± 0.60	-3.16	-4.27%	70.58 ± 2.31	-3.50	-4.73%		

NaCl 1.0M (2)	Valor teórico calculado (25°C)		74.08 ^{*1}			74.08 ^{*1}			
	C.B.	1	71.87 ± 0.62	-2.21	-2.98%	72.30 ± 2.34	-1.78	-2.41%	
		2	71.47 ± 0.76	-2.61	-3.53%	72.85 ± 2.88	-1.23	-1.66%	
		3	71.06 ± 0.58	-3.02	-4.08%	71.83 ± 2.77	-2.25	-3.04%	
	Promedio		71.47 ± 0.65	-2.61	-3.53%	72.32 ± 2.66	-1.76	-2.37%	
	T.E.	1	71.19 ± 0.32	-2.89	-3.90%	70.59 ± 1.31	-3.49	-4.71%	
		Promedio		71.19 ± 0.32	-2.89	-3.90%	70.59 ± 1.31	-3.49	-4.71%
NaCl 2.0M (2)	Valor teórico calculado (25°C)		76.18 ^{*1}			76.18 ^{*1}			
	C.B.	1	75.70 ± 2.24	-0.48	-0.63%	70.26 ± 1.13	-5.92	-7.77%	
		2	73.49 ± 0.42	-2.69	-3.53%	72.00 ± 1.24	-4.18	-5.49%	
		3	73.77 ± 0.85	-2.41	-3.16%	72.40 ± 0.72	-3.78	-4.97%	
	Promedio		74.32 ± 1.17	-1.86	-2.44%	71.55 ± 1.03	-4.63	-6.07%	
	T.E.	1	72.26 ± 1.11	-3.92	-5.15%	70.72 ± 2.13	-5.46	-7.17%	
		Promedio		72.26 ± 1.11	-3.92	-5.15%	70.72 ± 2.13	-5.46	-7.17%
KCl 1.0M	Valor teórico calculado (25°C)		73.98 ^{*1}			73.98 ^{*1}			
	C.B.	1	70.90 ± 1.07	-3.08	-4.16%	73.15 ± 0.55	-0.83	-1.13%	
		Promedio		70.90 ± 1.07	-3.08	-4.16%	73.15 ± 0.55	-0.83	-1.13%
	T.E.	1	70.67 ± 1.47	-3.31	-4.47%	69.76 ± 2.05	-4.22	-5.71%	
		2	70.51 ± 0.77	-3.47	-4.70%	72.43 ± 0.62	-1.55	-2.10%	
Promedio		70.59 ± 1.12	-3.39	-4.58%	71.09 ± 1.34	-2.89	-3.90%		

CaCl2 1.0M	Valor teórico calculado (25°C)		75.88 ^{*1}		75.88 ^{*1}			
	C.B.	1	72.04 ± 0.80	-3.84	-5.06%	72.48 ± 0.32	-3.40	-4.48%
		2	72.17 ± 1.60	-3.71	-4.89%	71.36 ± 0.49	-4.52	-5.95%
		3	72.34 ± 1.44	-3.54	-4.66%	71.47 ± 2.85	-4.41	-5.82%
		4	72.26 ± 1.56	-3.62	-4.76%	71.31 ± 0.35	-4.57	-6.02%
	Promedio		72.20 ± 1.35	-3.68	-4.84%	71.66 ± 1.00	-4.22	-5.57%
	T.E.	1	71.85 ± 1.19	-4.03	-5.31%	71.67 ± 1.36	-4.21	-5.55%
		2	70.65 ± 0.96	-5.23	-6.89%	70.50 ± 1.05	-5.38	-7.09%
		Promedio		71.25 ± 1.08	-4.63	-6.10%	71.08 ± 1.20	-4.80

*1 El "valor teórico calculado" de tensión superficial de las soluciones electrolíticas se obtiene a partir de los *incrementos individuales de tensión superficial para iones acuosos*, k_i , de Marcus (2016) contenidos en la Tabla 6.1.

$$\text{Valor teórico calculado} = \text{Tensión superficial del agua} \left(\frac{mN}{m} \right) + \text{Conc. catión} (M) * \left(k_{\text{catión}} \left[\frac{\left(\frac{mN}{m} \right)}{(M)} \right] \right) + \text{Conc. Anión} (M) \left(k_{\text{Anión}} \left[\frac{\left(\frac{mN}{m} \right)}{(M)} \right] \right)$$

Tabla 9.5 Diferencia porcentual absoluta mínima y máxima entre los valores experimentales de tensión superficial de disoluciones de NaCl a diferentes concentraciones y soluciones de KCl y CaCl₂ a una concentración 1.0 M

Substancia	Concentración (M)	Desviación	Método 1	Método 2
NaCl	0.1	Mínimo	1.89%	2.37%
		Máximo	4.53%	4.83%
	0.2	Mínimo	3.43%	2.10%
		Máximo	5.83%	3.46%
	0.4	Mínimo	5.39%	2.28%
		Máximo	5.83%	2.83%
	0.6	Mínimo	2.26%	3.23%
		Máximo	3.38%	4.52%
	0.8	Mínimo	3.25%	1.77%
		Máximo	5.33%	5.09%
	1.0	Mínimo	2.98%	1.66%
		Máximo	4.82%	5.47%
2.0	Mínimo	0.63%	4.97%	
	Máximo	5.15%	7.77%	
KCl	1.0	Mínimo	4.16%	1.13%
		Máximo	4.70%	5.71%
CaCl ₂	1.0	Mínimo	4.66%	4.48%
		Máximo	6.89%	7.09%

Al observar los resultados de tensión superficial obtenidos con la Solución 1 de NaCl con respecto a la concentración (ver **¡Error! No se encuentra el origen**

de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) se observó:

1. Una tendencia positiva conforme a las concentraciones 0.1, 0.2, 0.4 y 0.6 M.
2. Una tendencia negativa conforme a las concentraciones 0.8 y 1.0 M.
3. Una tensión superficial en todos casos menor a la del agua desionizada.

Debido a las observaciones denotadas en el punto 2 y a su discrepancia con la teoría, se realizó una serie de experimentaciones adicionales con la Solución 1 a las concentraciones de 0.8 y 1.0 M a las mismas condiciones.

Los resultados obtenidos fueron similares a las experimentaciones previas, por lo que se optó por llevar a cabo el procedimiento completo para las concentraciones de 0.8, 1.0 y 2.0 M (ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). La Solución 2 se realizó a partir de cristales de NaCl tomados de un recipiente perteneciente a un lote diferente al de la Solución 1, el agua desionizada utilizada fue tomada de un reservorio diferente al de la Solución 1 y se tuvo especial cuidado en el lavado de la instrumentación.

Los resultados obtenidos con la Solución 2 fueron:

1. Una tensión superficial a concentraciones de 0.8 y 1.0 M mayor que la obtenida con la Solución 1.
2. Una tendencia positiva conforme a las concentraciones 0.8, 1.0 y 2.0 M.
3. Una tensión superficial en todos los casos menor a la del agua desionizada.

En la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., se muestran los resultados de ambas soluciones donde se observa una tendencia positiva y aparentemente lineal, tal y como se esperaba conforme a la teoría.

Conforme a la Tabla 9.5 se observa una desviación máxima absoluta para el Método 1 de 6.63% y para el Método 2 de 7.77% y un mínimo de 0.63% y 1.10% respectivamente.

Conclusiones

- A partir de una amplia revisión de metodologías de burbuja ascendente enfocadas en métodos experimentales, modelos matemáticos-experimentales y métodos de cálculo para predecir la tensión superficial y la forma de la burbuja, se propone una nueva secuencia de programación en MATLAB® la cual efectúa simultáneamente el tratamiento de imágenes tomadas de la burbuja ascendente y resuelve tres métodos basados en el análisis tipo ADSA. El primer método es del tipo ADSA-D (Método 1), el segundo del tipo ADSA- P (Método 2) y el tercero mediante un arreglo de la ecuación de planteada por Vafaei y Wen (2015) que es una combinación de los tipos ADSA-CP y ADSA-HD (Método 3).
- De acuerdo con los valores experimentales de tensión superficial obtenidos mediante los tres métodos de cálculo propuestos, se concluye que los métodos del tipo ADSA-D y ADSA-P son los más adecuados para determinar valores de tensión superficial a partir de la celda construida debido a que la incertidumbre asociada a estos métodos es menor al $\pm 10\%$ de acuerdo con el valor de referencia reportado en la literatura.
- Con respecto al método del crecimiento de burbuja ascendente cuasi-estático y el método de tiempo de envejecimiento de burbuja, se concluye que ambas metodologías son viables para determinar la tensión superficial a partir de la celda construida. La diferencia más notable entre estos dos métodos radica en que mediante el método de tiempo de envejecimiento de burbuja es posible observar de manera más consistente la susceptibilidad de la forma de la burbuja a los factores externos.

- Se encontró que el sistema presenta susceptibilidad a la limpieza del material, el correcto ángulo entre la lente de la cámara y la burbuja, el ángulo de incidencia y el tipo de luz empleado en la experimentación, los cambios de presión y a las vibraciones, mismos factores que afectan a equipos comerciales.

- El costo de los equipos comerciales para determinar la tensión superficial a través del método de burbuja ascendente y gota pendiente es de aproximadamente de \$35 000.00 DLS más impuestos. En comparación, el costo de la celda construida fue de \$45 000.00 MN más impuestos, lo que equivale al 6.8% del valor de un equipo comercial.

- Por todo lo anterior, el sistema propuesto constituye una opción confiable y económicamente viable para medir la tensión superficial.

Recomendaciones

1. Probar otros adhesivos para sellar la celda de modo que no influya en la medición de la tensión superficial y soporte la presión ejercida por el baño de agua.

2. Construir un sistema mediante el cual la temperatura del aire inyectado hacia la burbuja se encuentre a la misma temperatura que el líquido a evaluar.

3. Determinar la tensión superficial mediante el uso de un dispositivo móvil que cuente con una cámara de alta definición y la celda construida, así como H. Chen, Muros-Cobos, Holgado-Terriza, y Amirfazli (2017) lo efectuaron para el sistema de gota pendiente.

Referencias

- Acrivós, A. (1979). Bubbles, Drops and Particles. By R. C LIFT , J. R. G RACE and M. E. W EBER . Academic Press, 1978. 380 pp. £20.80 or \$32.00. *Journal of Fluid Mechanics*, 94(4), 795–796. <https://doi.org/10.1017/S0022112079221290>
- Andreas, J. M., Hauser, E. A., & Tucker, W. B. (1938). Boundary Tension by Pendant Drop. *The Journal of Physical Chemistry*, 42(8), 1001–1019. <https://doi.org/10.1021/j100903a002>
- Azizian, S., Bashavard, N., & Yahyaei, B. (2006). Surface Properties of Dilute Solutions of Alkanes in Benzyl Alcohol. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 51(1), 56–59. <https://doi.org/10.1021/je050159x>
- Bari, Sergio di, & Robinson, A. J. (2013). Experimental study of gas injected bubble growth from submerged orifices. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.06.005>
- Birdi, K. S. (2002). *Handbook of Surface and Colloid Chemistry*. (K. S. Birdi, Ed.), *Handbook of Surface and Colloid Chemistry, Second Edition*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420040944>
- Birdi, K. S. (2009). *Handbook of Surface and Colloid Chemistry* (Third Edit). Boca Raton, Florida: CSC Press.
- Birdi, K. S. (2010). *Surface and Colloid Chemistry. Principles and Applications*. CRC Press, Taylor & Francis.
- Boström, M., Williams, D. R. M., & Ninham, B. W. (2001). Surface Tension of Electrolytes: Specific Ion Effects Explained by Dispersion Forces. *Langmuir*, 17(15), 4475–4478. <https://doi.org/10.1021/la0102298>
- Cai, Y., Deng, X., Liu, T., Zhao, M., Zhao, Q., & Chen, S. (2018). Effect of xanthan gum on walnut protein/xanthan gum mixtures, interfacial adsorption, and emulsion properties. *Food Hydrocolloids*, 79, 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.006>
- Cano Gómez, J. J. (2013). *DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL Y PREDICCIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE 1-ALCOHOLES*. Instituto Tecnológico de Celaya.
- Chen, H., Muros-Cobos, J. L., Holgado-Terriza, J. A., & Amirfazli, A. (2017). Surface tension measurement with a smartphone using a pendant drop. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 533, 213–217. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.08.019>
- Chen, Hailong, Li, Z., Wang, F., Wang, Z., & Zhihan, G. (2017). Extrapolation of surface tensions of electrolyte and associating mixtures solutions. *Chemical Engineering Science*, 162, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.12.028>
- David, R., Ninomiya, H., Winklbauer, R., & Neumann, A. W. (2009). Tissue surface tension measurement by rigorous axisymmetric drop shape analysis. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 72(2), 236–240. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2009.04.009>

- Di Bari, S., Lakehal, D., & Robinson, A. J. (2013). A numerical study of quasi-static gas injected bubble growth: Some aspects of gravity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *64*, 468–482. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.002>
- Di Bari, Sergio, & Robinson, A. J. (2013). Adiabatic bubble growth in uniform DC electric fields. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *44*, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.06.004>
- Ebnesajjad, S. (2011). Surface Tension and Its Measurement. En *Handbook of Adhesives and Surface Preparation* (pp. 21–30). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-4461-3.10003-3>
- Fainerman, V. B., Makievski, A. V., & Miller, R. (1993). The measurement of dynamic surface tensions of highly viscous liquids by the maximum bubble pressure method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *75*, 229–235. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(93\)80434-G](https://doi.org/10.1016/0927-7757(93)80434-G)
- Fainerman, V. B., Trukhin, D. V., Zinkovych, I. I., & Miller, R. (2018). Interfacial tensiometry and dilational surface visco-elasticity of biological liquids in medicine. *Advances in Colloid and Interface Science*, *255*, 34–46. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.08.002>
- Fathinasab, M., Ayatollahi, S., Taghikhani, V., & Shokouh, S. P. (2018). Minimum miscibility pressure and interfacial tension measurements for N₂ and CO₂ gases in contact with W/O emulsions for different temperatures and pressures. *Fuel*, *225*(April 2017), 623–631. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.134>
- Flood, E. A., & Benson, G. C. (1968). Surface energy and surface tension. *Canadian Journal of Chemistry*, *46*(8), 1297–1316. <https://doi.org/10.1139/v68-217>
- Fordham, S. (1948). On the calculation of surface tension from measurements of pendant drops. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, *194*(1036), 1–16. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0063>
- Franses, E. I., Basaran, O. A., & Chang, C.-H. (1996). Techniques to measure dynamic surface tension. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *1*(2), 296–303. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(96\)80018-5](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(96)80018-5)
- Friedbacher, G., & Bubert, H. (Eds.). (2011). *Surface and Thin Film Analysis*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527636921>
- Gerlach, D., Biswas, G., Durst, F., & Kolobaric, V. (2005). Quasi-static bubble formation on submerged orifices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *48*(2), 425–438. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.002>
- Gharedaghi, H., Dousti, A., Eshraghi, J., Hanafizadeh, P., & Ashjaee, M. (2017). A novel numerical approach for investigation of the gas bubble characteristics in stagnant liquid using Young-Laplace equation. *Chemical Engineering Science*, *173*, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.07.018>
- Gijsenbergh, P., & Puers, R. (2018). A fast and accurate Langmuir-type polymer microtensiometer. *Advances in Colloid and Interface Science*, *255*, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.08.007>

- Gunde, R., Kumar, A., Lehnert-Batar, S., Mäder, R., & Windhab, E. J. (2001). Measurement of the Surface and Interfacial Tension from Maximum Volume of a Pendant Drop. *Journal of Colloid and Interface Science*, 244(1), 113–122. <https://doi.org/10.1006/JCIS.2001.7916>
- Hasan, N., Schwieger, C., Tee, H. T., Wurm, F. R., Busse, K., & Kressler, J. (2018). Crystallization of a polyphosphoester at the air-water interface. *European Polymer Journal*, 101(March), 350–357. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.03.001>
- Hoorfar, M., & W. Neumann, A. (2006). Recent progress in Axisymmetric Drop Shape Analysis (ADSA). *Advances in Colloid and Interface Science*, 121(1–3), 25–49. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.06.001>
- Israelachvili, J. N. (2011a). Strong Intermolecular Forces: Covalent and Coulomb Interactions. En *Intermolecular and Surface Forces* (pp. 53–70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375182-9.10003-X>
- Israelachvili, J. N. (2011b). Thermodynamic and Statistical Aspects of Intermolecular Forces. En *Intermolecular and Surface Forces* (pp. 23–51). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375182-9.10002-8>
- IUPAC. (2014). *Compendium of Chemical Terminology. Gold Book* (2.3.3. 201).
- Juárez Carrillo, A. (2005). *TENSIÓN SUPERFICIAL EN EL SISTEMA TERNARIO AGUA - BUTANOL - 2-BUTOXIETANOL*. Facultad de Química, UNAM.
- Kalantarian, A., Ninomiya, H., Saad, S. M. I., David, R., Winklbauer, R., & Neumann, A. W. (2009). Axisymmetric Drop Shape Analysis for Estimating the Surface Tension of Cell Aggregates by Centrifugation. *Biophysical Journal*, 96(4), 1606–1616. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2008.10.064>
- Kazemzadeh, Y., Eshraghi, S. E., Riazi, M., & Zendehboudi, S. (2018). How do metal oxide nanoparticles influence on interfacial tension of asphaltic oil-Supercritical CO₂ systems? *The Journal of Supercritical Fluids*, 135(December 2017), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.12.007>
- Koh, J. J., Zhang, X., Kong, J., & He, C. (2018). Compatibilization of multicomponent composites through a transitioning phase: Interfacial tensions considerations. *Composites Science and Technology*, 164(January), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.05.030>
- Kwok, D. Y., Vollhardt, D., Miller, R., Li, D., & Neumann, A. W. (1994). Axisymmetric drop shape analysis as a film balance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 88(1), 51–58. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(94\)80085-5](https://doi.org/10.1016/0927-7757(94)80085-5)
- Leroy, P., Lassin, A., Azaroual, M., & André, L. (2010). Predicting the surface tension of aqueous 1:1 electrolyte solutions at high salinity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(19), 5427–5442. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.06.012>
- Lesage, F. J., & Marois, F. (2013). Experimental and numerical analysis of quasi-static bubble size and shape characteristics at detachment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64(64), 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.019>
- Levine, I. N. (2009). *Physical Chemistry* (Sixth Edit). New York: Mc Graw Hill Higher Education.

- Li, H., Zhang, X., Wang, J., Li, C., Liu, S., Wu, H., & Guo, S. (2018). The mechanism for the temperature-dependency of the interfacial interaction in polyamide/tin-fluorophosphate glass composites. *Composites Science and Technology*, *159*, 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.03.011>
- Li, J., Wang, C., Li, X., Su, Y., Yang, Y., & Yu, X. (2018). Effects of pH and NaCl on the physicochemical and interfacial properties of egg white/yolk. *Food Bioscience*, *23*(November 2017), 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2017.12.004>
- Manciu, M., Manciu, F. S., & Ruckenstein, E. (2017). On the surface tension and Zeta potential of electrolyte solutions. *Advances in Colloid and Interface Science*, *244*, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.06.006>
- Marcus, Y. (2010). Surface Tension of Aqueous Electrolytes and Ions. *Journal of Chemical & Engineering Data*, *55*(9), 3641–3644. <https://doi.org/10.1021/je1002175>
- Marcus, Y. (2016). Specific ion effects on the surface tension and surface potential of aqueous electrolytes. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, *23*, 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2016.06.016>
- Miller, R., Sedev, R., Schano, K.-H., Ng, C., & Neumann, A. W. (1993). Relaxation of adsorption layers at solution/air interfaces using axisymmetric drop-shape analysis. *Colloids and Surfaces*, *69*(4), 209–216. [https://doi.org/10.1016/0166-6622\(93\)80002-W](https://doi.org/10.1016/0166-6622(93)80002-W)
- Mizev, A., Shmyrova, A., Mizeva, I., & Pshenichnikova-Peleneva, I. (2018). Exhaled breath barbotage: A new method of pulmonary surfactant dysfunction assessing. *Journal of Aerosol Science*, *115*(October 2017), 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.10.011>
- Modlińska, A., Chrzumnicka, E., & Martyński, T. (2017). Self-aggregates formation of tetrachloroerylene acid esters in Langmuir and Langmuir-Blodgett films. *Opto-Electronics Review*, *25*(4), 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2017.06.008>
- Morales, F. J. T. (2002). *Efecto de la Geometría Molecular en la Tensión Superficial. El caso de sistemas Binarios agua/alcohol y alcano/alcohol*. Facultad de Química UNAM.
- Morrison, R. T., & Boyd, R. N. (1998). *QUIMICA ORGANICA*. (Person Education, Ed.) (Quinta). Addison Wesley. Recuperado de <http://148.206.53.84/tesiuami/Libros/L25.pdf>
- Neumann, A. W., David, R., & Zuo, T. (Eds.). (2011). *Applied Surface Thermodynamics* (2nd ed., Vol. 151). CRC Press, Taylor & Francis. Recuperado de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927776597891485>
- Okur, H. I., Chen, Y., Wilkins, D. M., & Roke, S. (2017). The Jones-Ray effect reinterpreted: Surface tension minima of low ionic strength electrolyte solutions are caused by electric field induced water-water correlations. *Chemical Physics Letters*, *684*, 433–442. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.06.018>
- Osorio, I. F. (1998). *Tensión Superficial y Funciones en Exceso*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Petersen, P. B., & Saykally, R. J. (2005). Adsorption of Ions to the Surface of Dilute Electrolyte Solutions: The Jones–Ray Effect Revisited. *Journal of the American Chemical Society*, 127(44), 15446–15452. <https://doi.org/10.1021/ja053224w>
- Prausnitz, J. M., Lichtenthaler, R. N., & Gomes de Azevedo, E. (1999). *Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria* (Third Edit). Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall PTR.
- Reyes Sandoval, G. A. (2002). *Modificación a los Métodos de Volúmen de Gota y de Gota Pendiente para la Determinación de tensión Superficial*. Facultad de Química, UNAM.
- Río, O. I. de., & Neumann, A. W. (1997). Axisymmetric Drop Shape Analysis: Computational Methods for the Measurement of Interfacial Properties from the Shape and Dimensions of Pendant and Sessile Drops. *Journal of Colloid and Interface Science*, 196(2), 136–147. <https://doi.org/10.1006/jcis.1997.5214>
- Roe, R. J., Bacchetta, V. L., & Wong, P. M. G. (1967). Refinement of pendent drop method for the measurement of surface tension of viscous liquid. *The Journal of Physical Chemistry*, 71(13), 4190–4193. <https://doi.org/10.1021/j100872a005>
- Saad, S. M. I., & Neumann, A. W. (2014). Total Gaussian curvature, drop shapes and the range of applicability of drop shape techniques. *Advances in Colloid and Interface Science*, 204, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.12.001>
- Saleh, M. A., Akhtar, S., Begum, S., Ahmed, M. S., & Begum, S. K. (2004). Density and Viscosity of 1-Alkanols. *Physics and Chemistry of Liquids*, 42(6), 615–623. <https://doi.org/10.1080/00319100412331284422>
- Sattari, A., & Hanafizadeh, P. (2019a). Bubble formation on submerged micrometer-sized nozzles in polymer solutions: An experimental investigation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 564, 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.12.029>
- Sattari, A., & Hanafizadeh, P. (2019b). Bubble formation on submerged micrometer-sized nozzles in polymer solutions: An experimental investigation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 564(December 2018), 10–22. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.12.029>
- Shi, L., Liu, J., Yang, J., Cai, L., Shi, L., & Qiu, H. (2017). Langmuir-Blodgett assembly of transparent graphene oxide-silver microwire hybrid films with an antibacterial property. *New Carbon Materials*, 32(4), 344–351. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(17\)60127-6](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(17)60127-6)
- Slavchov, R. I., & Novev, J. K. (2012). Surface tension of concentrated electrolyte solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 387(1), 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.07.020>
- Sobol, H., Garfias, J., & Keller, J. (1976). Effect on the water/air surface tension of air diffusion and interface structuring. *The Journal of Physical Chemistry*, 80(17), 1941–1948. <https://doi.org/10.1021/j100558a028>
- Stillinger, F. H. (1980). Water Revisited. *American Association for the Advancement of Science Stable*, 209(4455), 451–457. <https://doi.org/10.1126/science.209.4455.451>

- Tahghighi, M., Mannelli, I., Janner, D., & Ignés-Mullol, J. (2018). Tailoring plasmonic response by Langmuir–Blodgett gold nanoparticle templating for the fabrication of SERS substrates. *Applied Surface Science*, *447*, 416–422. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.03.237>
- Vafaei, S., Angeli, P., & Wen, D. (2011). Bubble growth rate from stainless steel substrate and needle nozzles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *384*(1–3), 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.03.066>
- Vafaei, S., Borca-Tasciuc, T., & Wen, D. (2010). Theoretical and experimental investigation of quasi-steady-state bubble growth on top of submerged stainless steel nozzles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *369*(1–3), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.07.009>
- Vafaei, S., Borca-Tasciuc, T., & Wen, D. (2014). Investigation of nanofluid bubble characteristics under non-equilibrium conditions. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *86*, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.10.010>
- Vafaei, S., & Wen, D. (2010a). Bubble formation in a quiescent pool of gold nanoparticle suspension. *Advances in Colloid and Interface Science*, *159*(1), 72–93. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.05.005>
- Vafaei, S., & Wen, D. (2010b). Bubble formation on a submerged micronozzle. *Journal of Colloid and Interface Science*, *343*(1), 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.08.005>
- Vafaei, S., & Wen, D. (2015). Modification of the Young-Laplace equation and prediction of bubble interface in the presence of nanoparticles. *Advances in Colloid and Interface Science*, *225*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.006>
- Verreault, D., & Allen, H. C. (2013). Bridging the gap between microscopic and macroscopic views of air/aqueous salt interfaces. *Chemical Physics Letters*, *586*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2013.08.054>
- Wang, J., Zhang, L., Zhao, J., Ai, L., & Yang, L. (2018). Variations in permeability along with interfacial tension in hydrate-bearing porous media. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *51*(December 2017), 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.12.029>
- Wohlfarth, B., & Wohlfarth, C. (1997). *Surface Tension of Pure Liquids and Binary Liquid Mixtures*. (M. D. Lechner, Ed.) (First, Vol. 16). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/b60566>
- Xie, F., Chen, C., Chen, J., & Liu, M. (2018). Transfer of molecular chirality to spiral nanostructure in the interfacial mixed amphiphilic diacetylene/histidine monolayers via in situ topochemical photopolymerization. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *355*, 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.08.046>
- Yu, L., Dong, M., Ding, B., & Yuan, Y. (2018). Experimental study on the effect of interfacial tension on the conformance control of oil-in-water emulsions in heterogeneous oil sands reservoirs. *Chemical Engineering Science*, *189*, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.05.033>

Yuan, Y., Zhan, W., Yi, H., Zhao, Y., & Song, S. (2018). Molecular dynamics simulations study for the effect of cations hydration on the surface tension of the electrolyte solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 539(November 2017), 80–84. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.12.005>

Zeppieri, S., & López de Ramos, A. (2009). DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL PARA EL SISTEMA ALCANO/AIRE Y ALCOHOL/AIRE MEDIANTE LA TÉCNICA DE LA GOTA COLGANTE: CORRELACIÓN PARA ALCANOS Y ALCOHOLES. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V*, 24(2), 71–77.

Zhang, C., Wang, P., Song, G., Qu, G., & Liu, J. (2018). Optimization and evaluation of binary composite foam system with low interfacial tension in low permeability fractured reservoir with high salinity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 160(March 2016), 247–257. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.10.047>

Zuidema, H., & Waters, G. (1941). Ring Method for the Determination of Interfacial Tension. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 13(5), 312–313. <https://doi.org/10.1021/i560093a009>

http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/CALCULODEINCERTIDUMBRESDR.JAVIERMIRANDA_26197.pdf

Anexo A

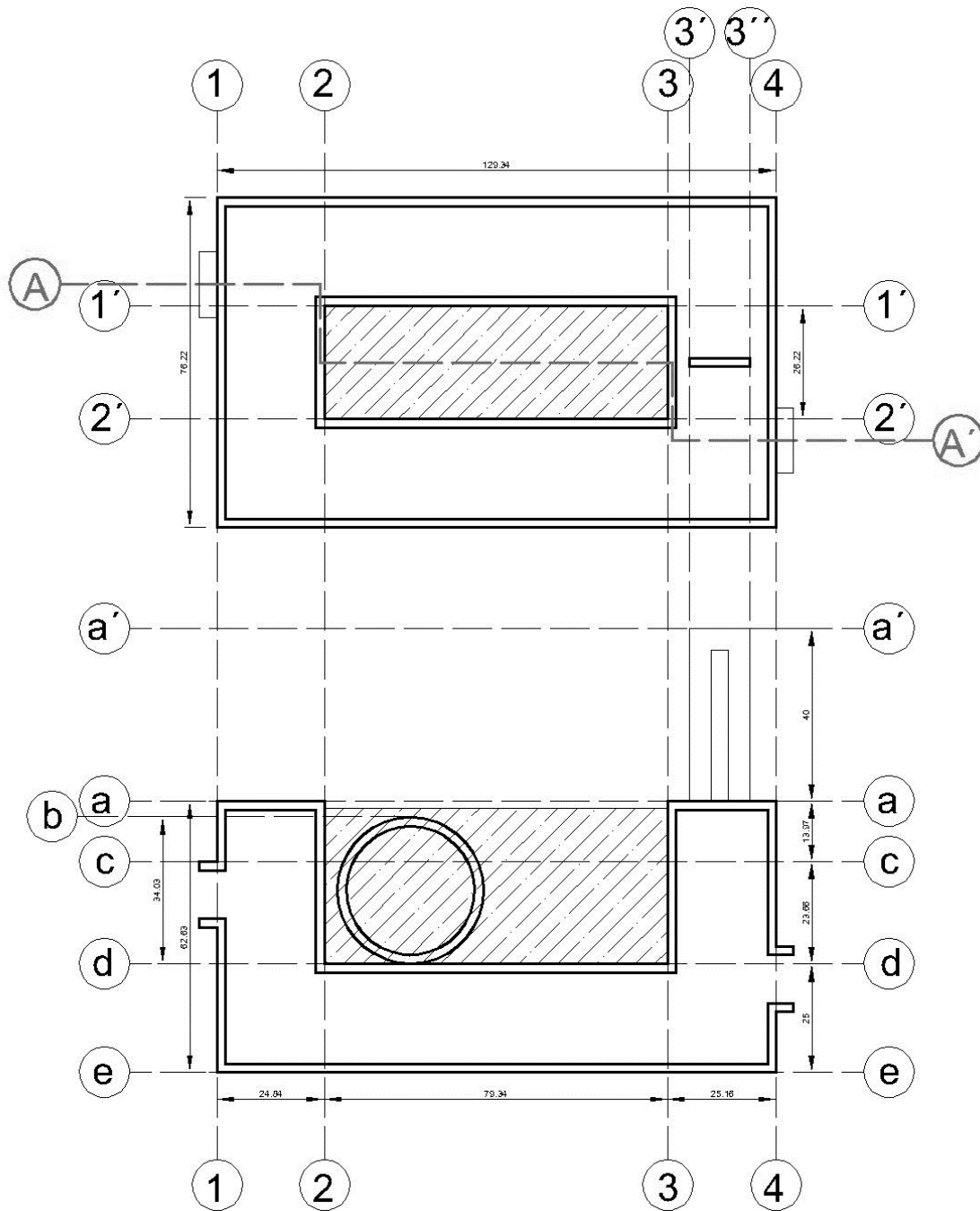


Figura A.1 Plano de la celda y corte AA' en milímetros. La zona sombreada corresponde al espacio que ocupa el líquido dentro de la celda

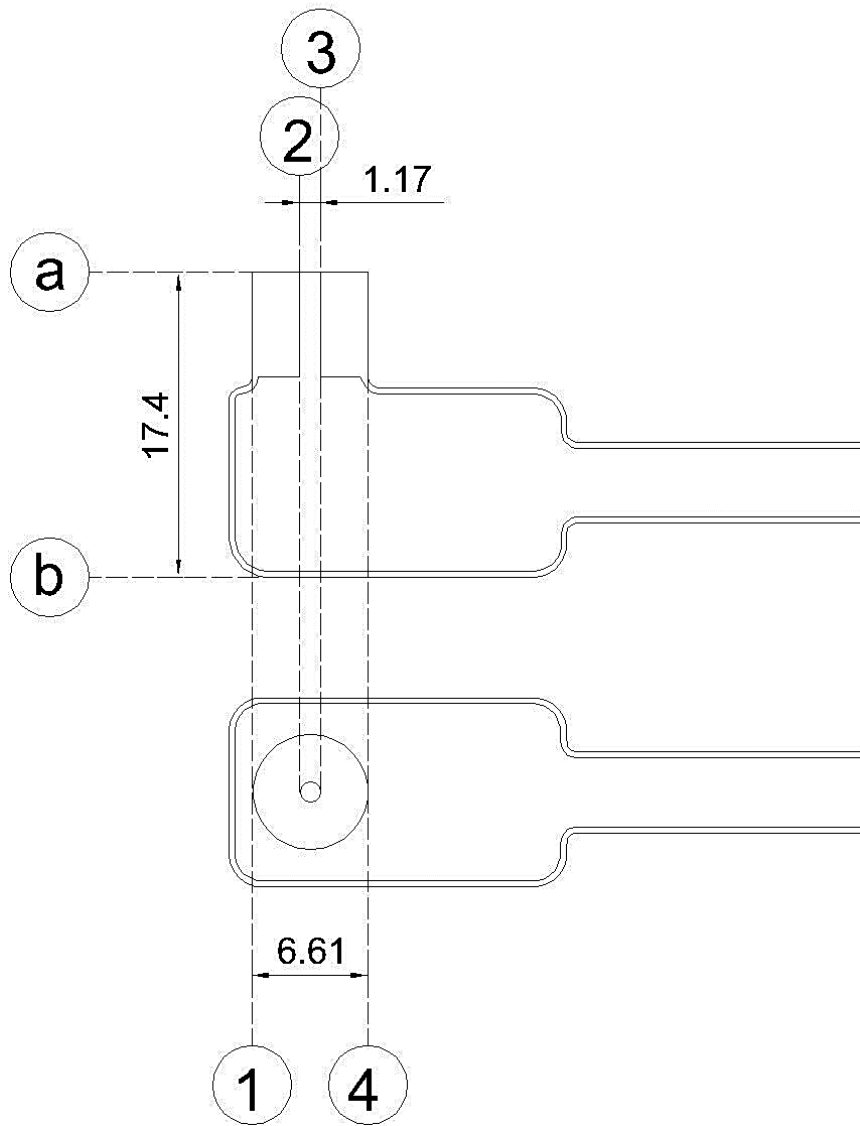


Figura A.2 Diagrama del capilar utilizado y medidas en milímetros

Anexo B

Procesamiento de imágenes e información

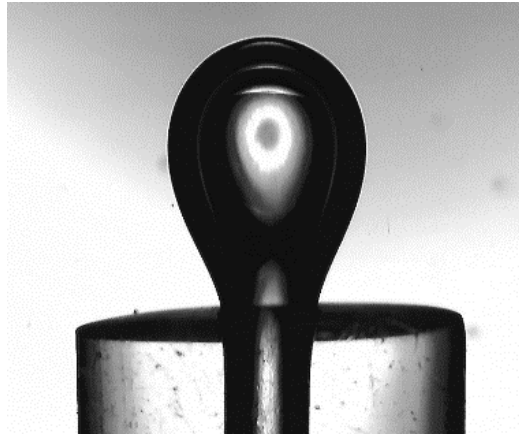


Figura B.1 Imagen tomada con la cámara

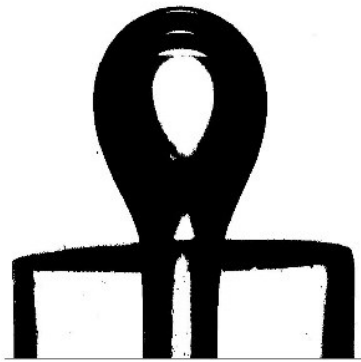


Figura B.2 Imagen binaria

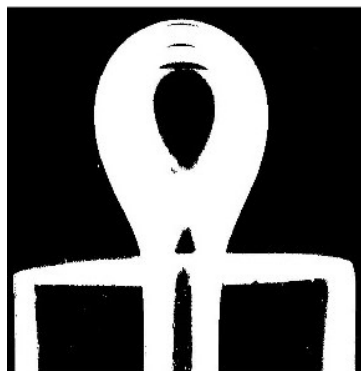


Figura B.3 Imagen binaria inversa

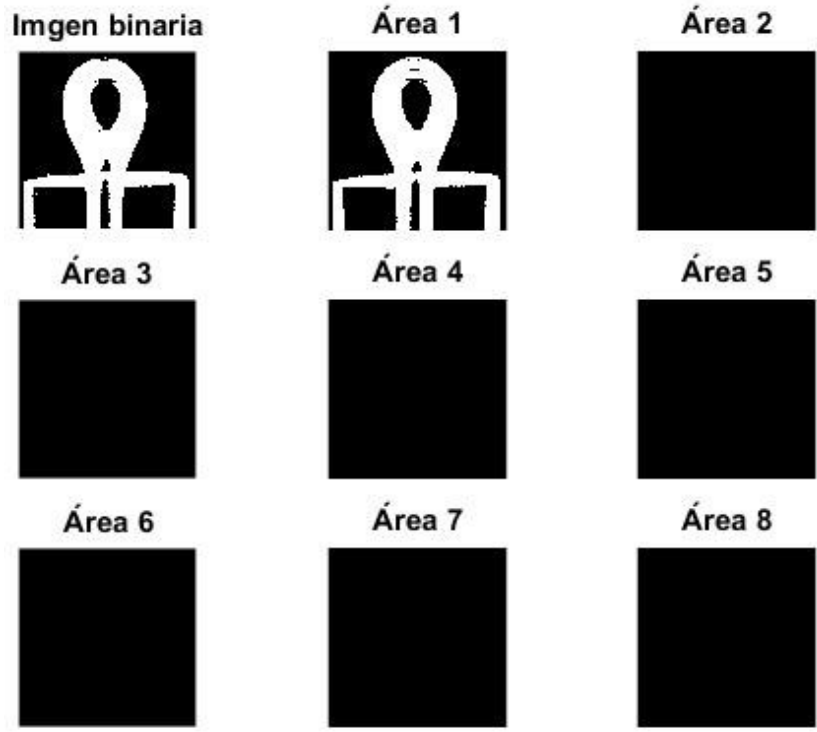


Figura B.4 Primera extracción de áreas blancas



Figura B.5 Inversión de colores y segunda extracción de áreas blancas

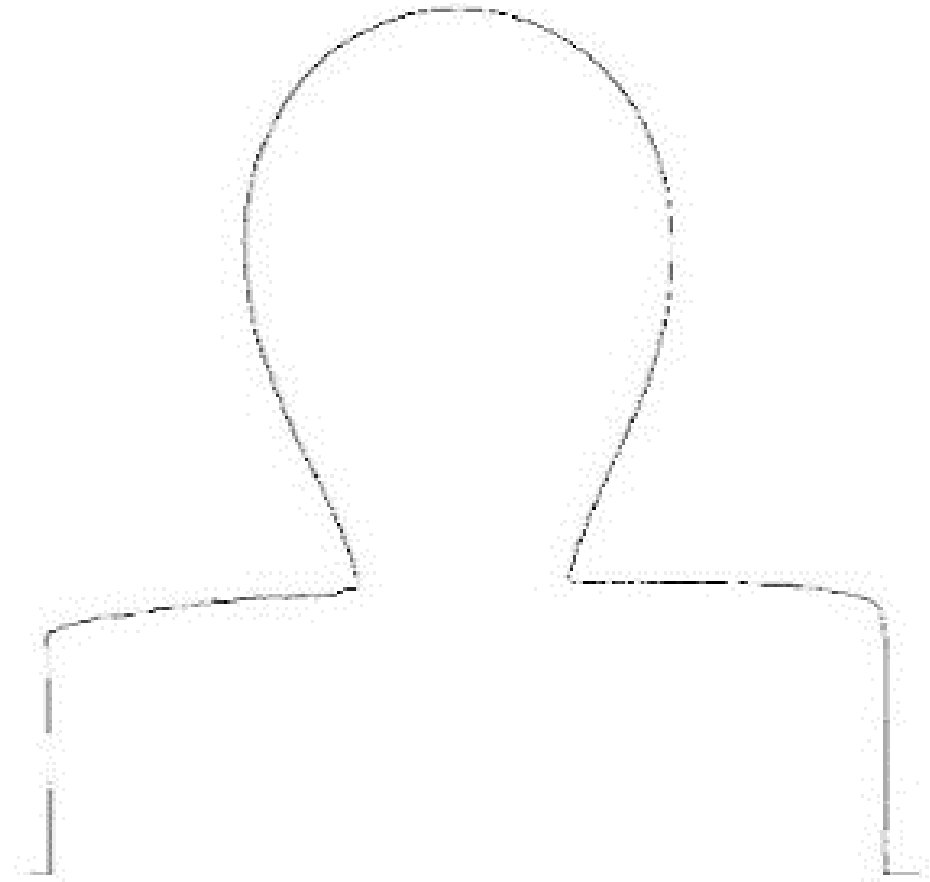


Figura B.6 Extracción del contorno de la burbuja con capilar

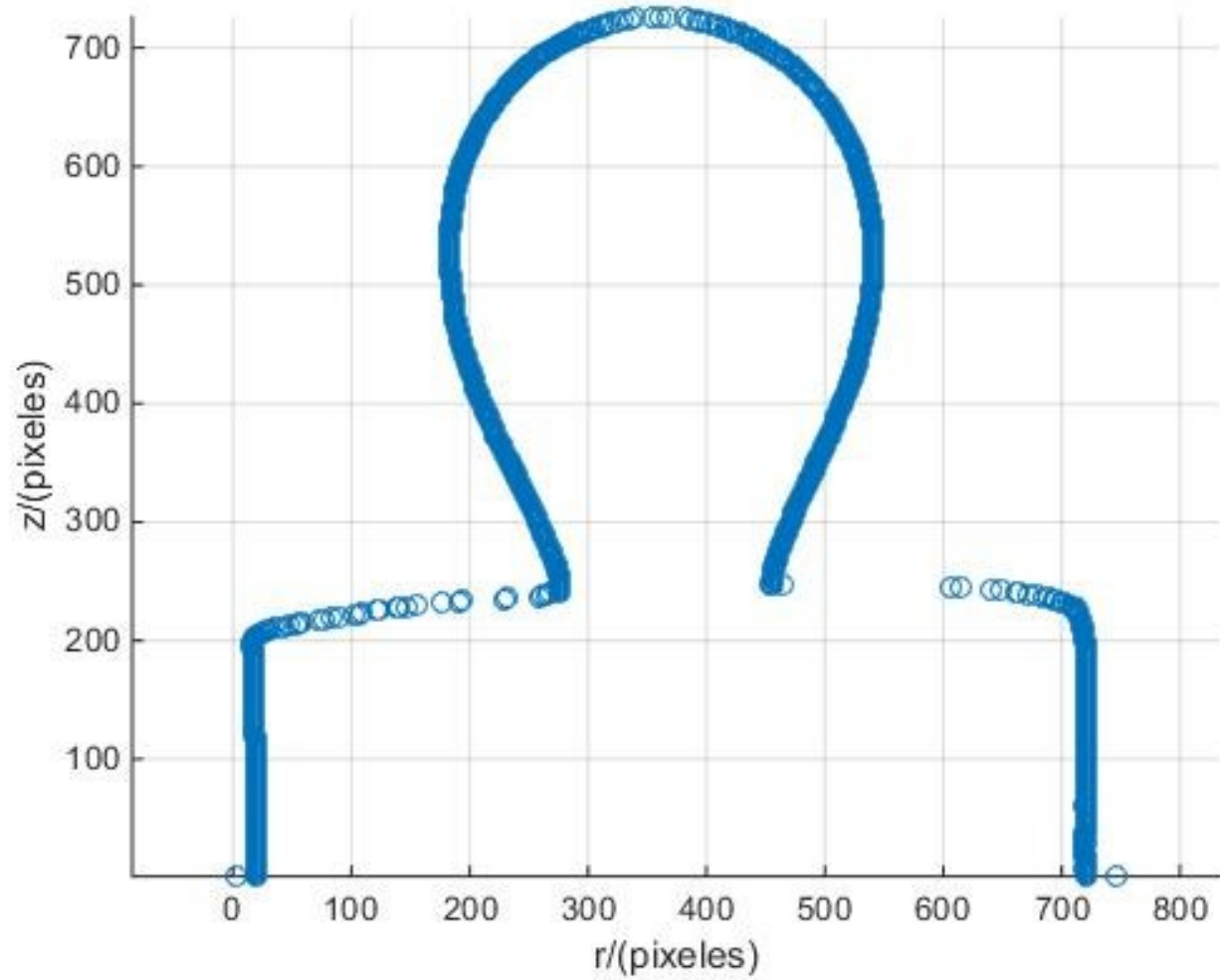


Figura B.7 Puntos coordenados del contorno del capilar y la burbuja dentro de la imagen

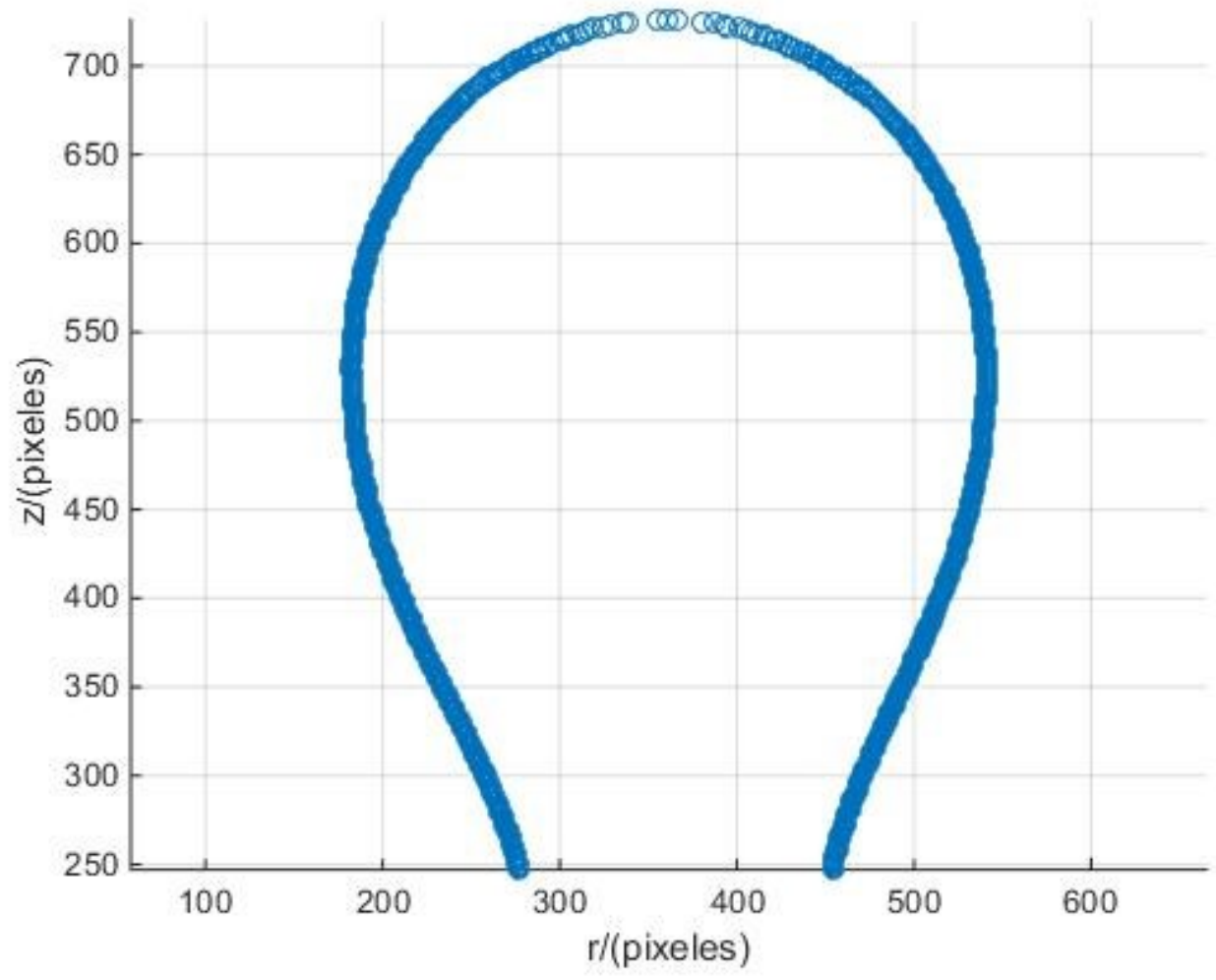


Figura B.8 Puntos coordenados del perfil de la burbuja dentro de la imagen

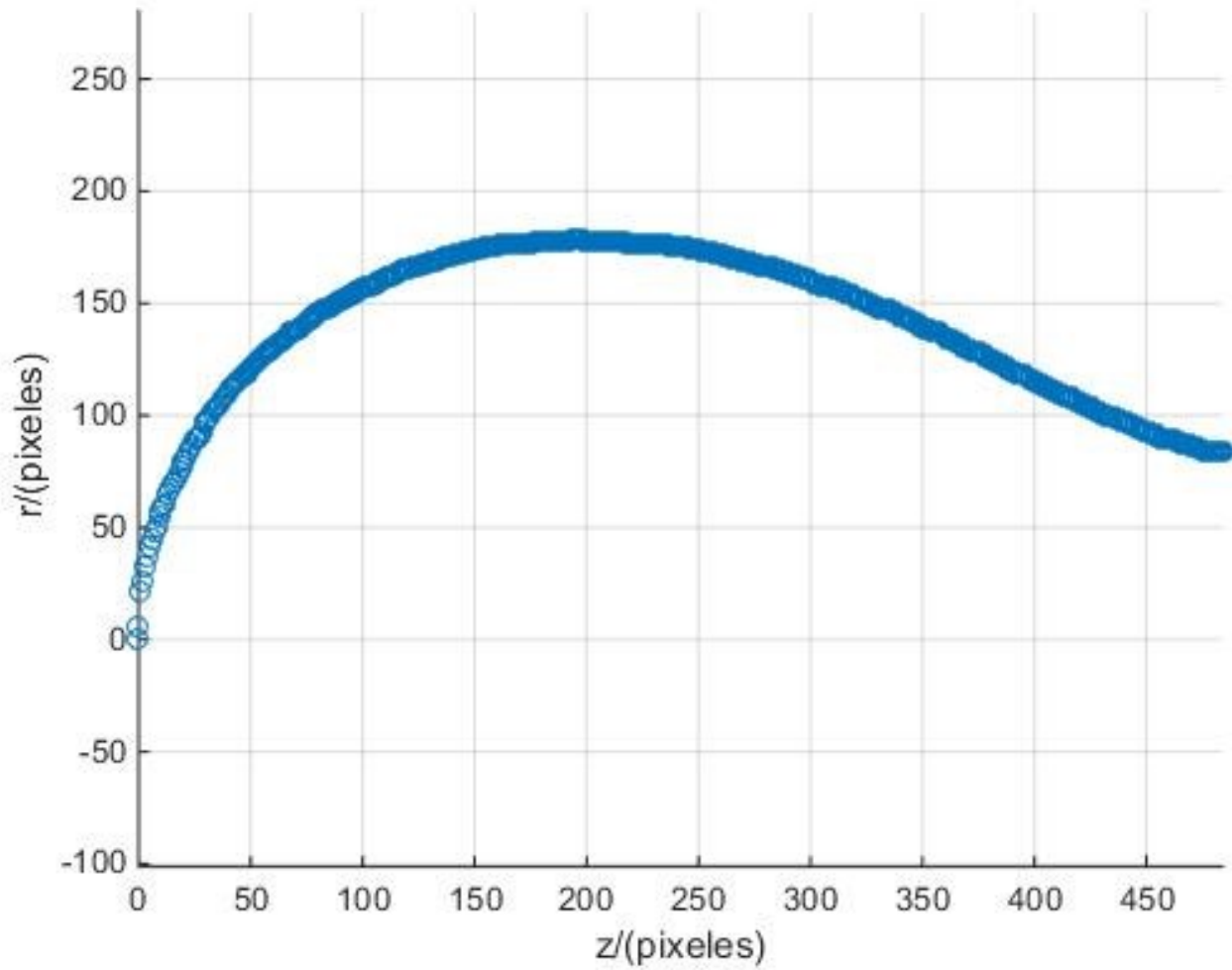


Figura B.9 Perfil (izquierdo o derecho) del contorno de burbuja y rotación del eje coordenado

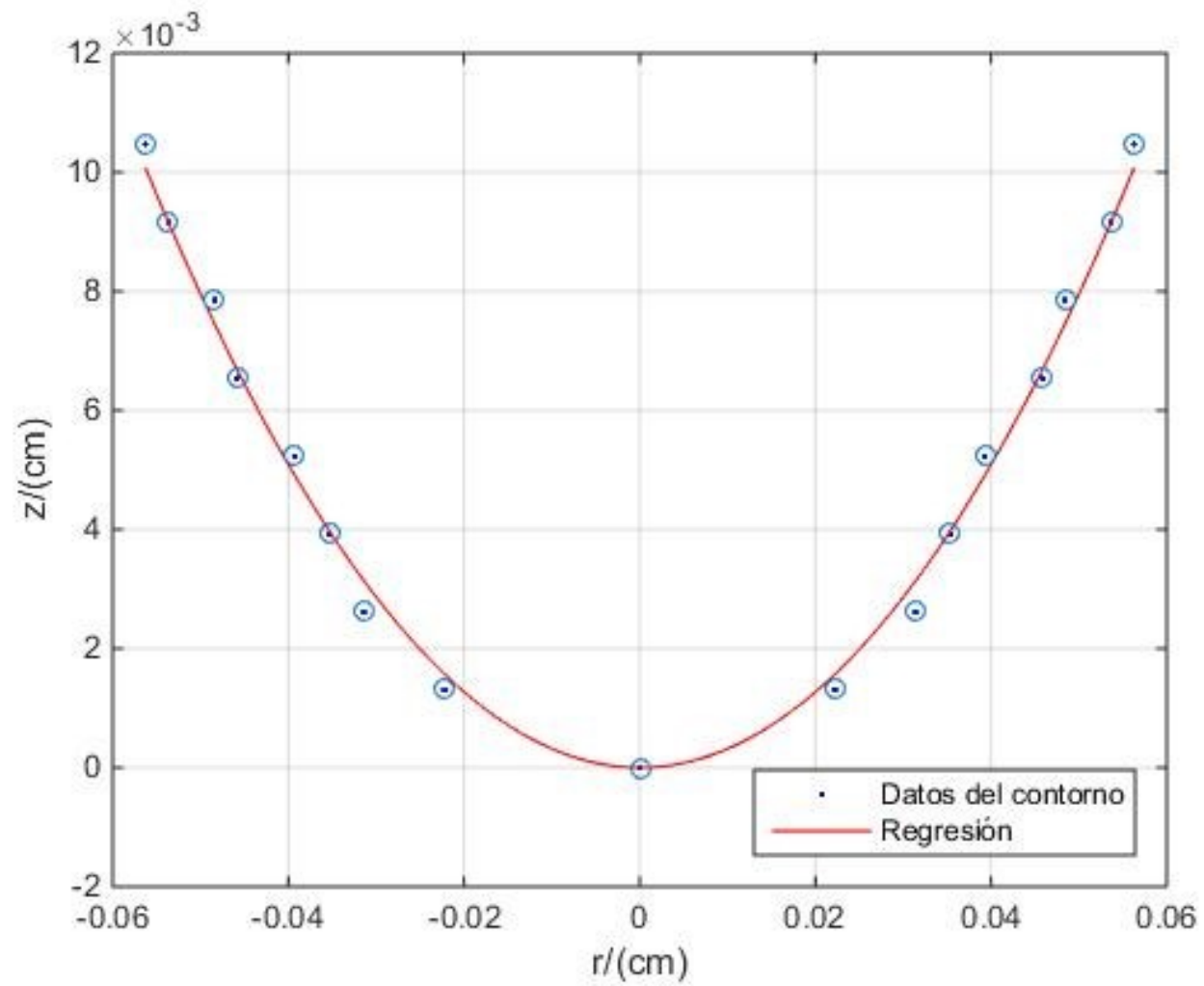


Figura B.10 Regresión del ápice de la burbuja

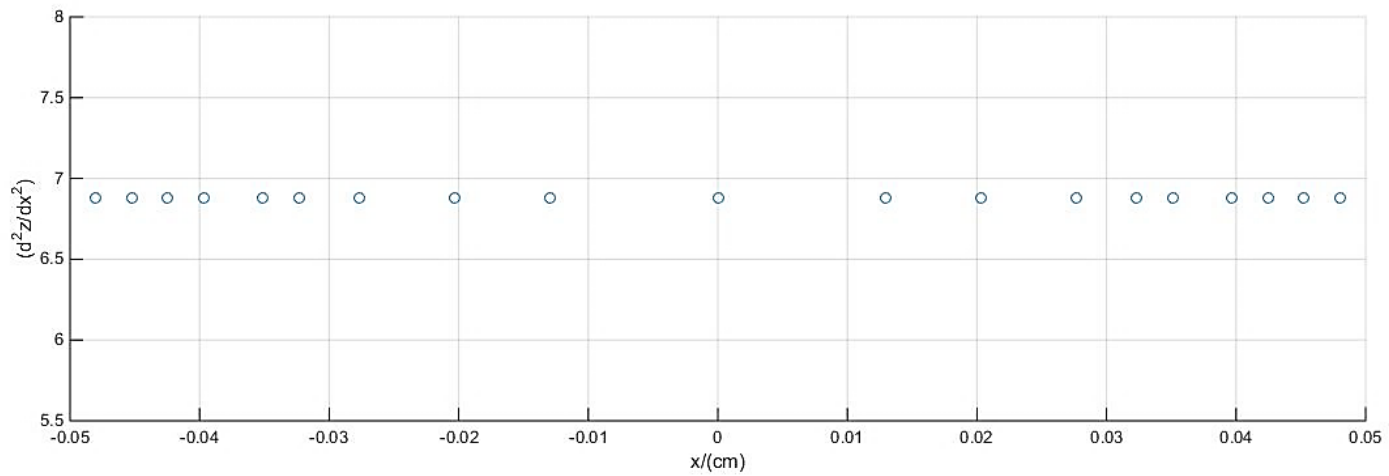
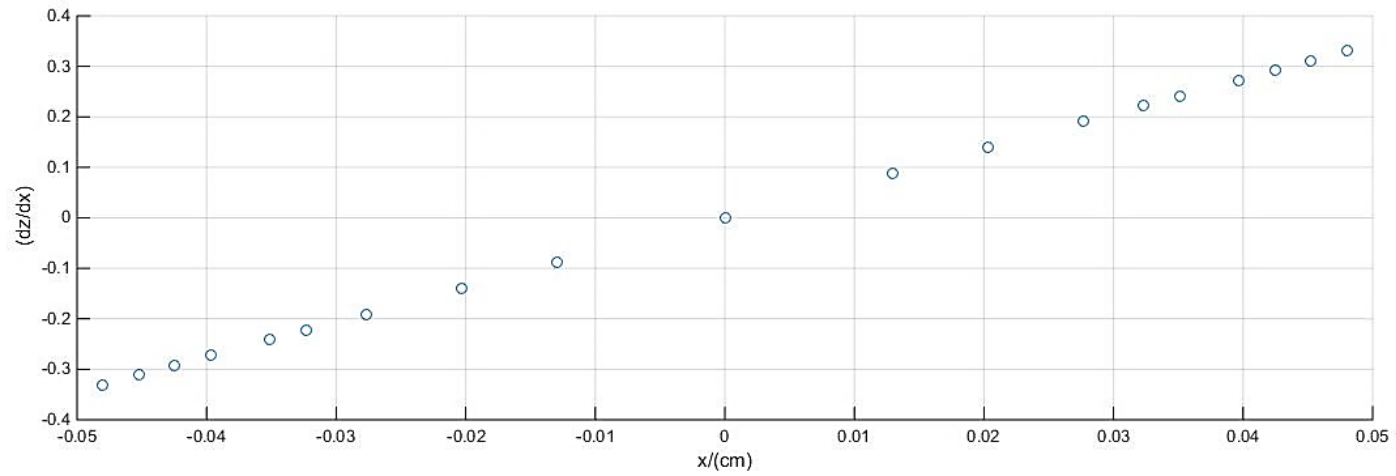


Figura B.11 Primera y segunda derivada de la función obtenida mediante la regresión en el ápice de la burbuja

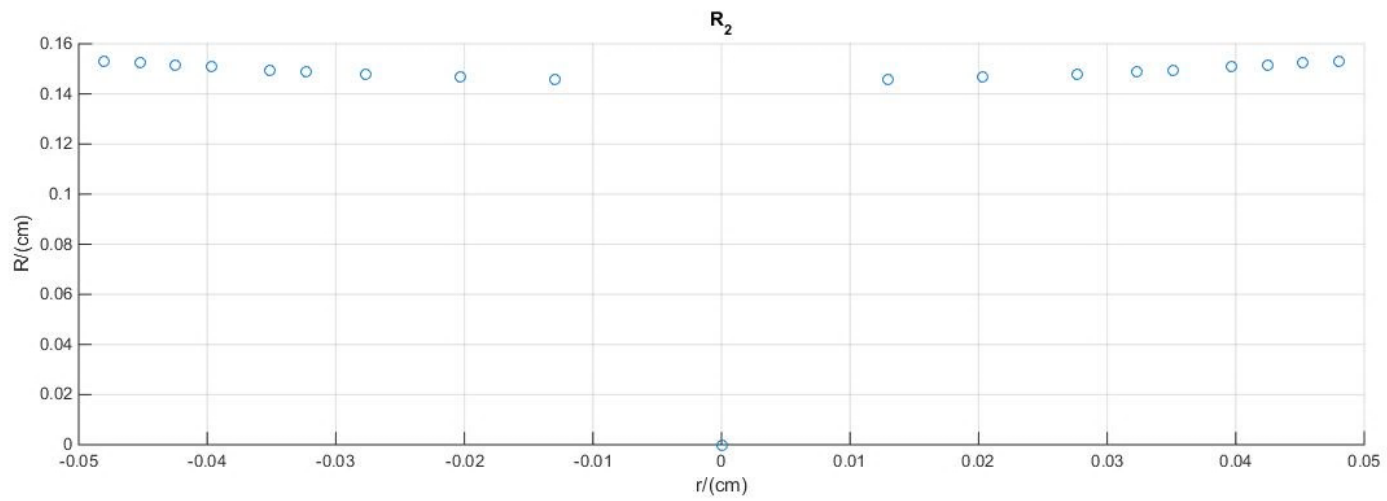
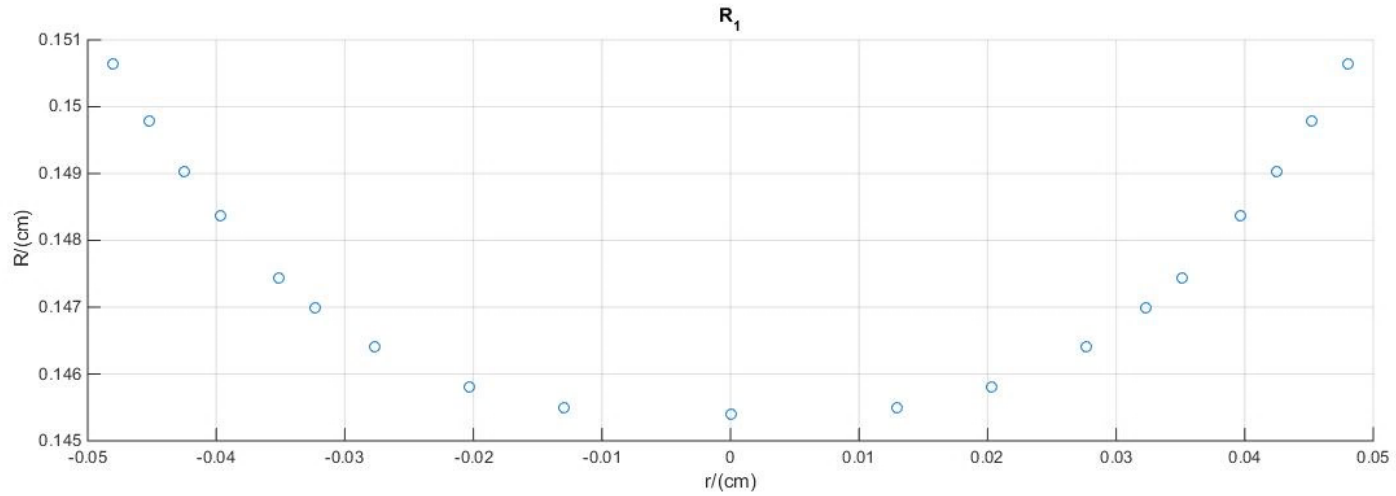


Figura B.12 Radios de curvatura en el ápice de la burbuja

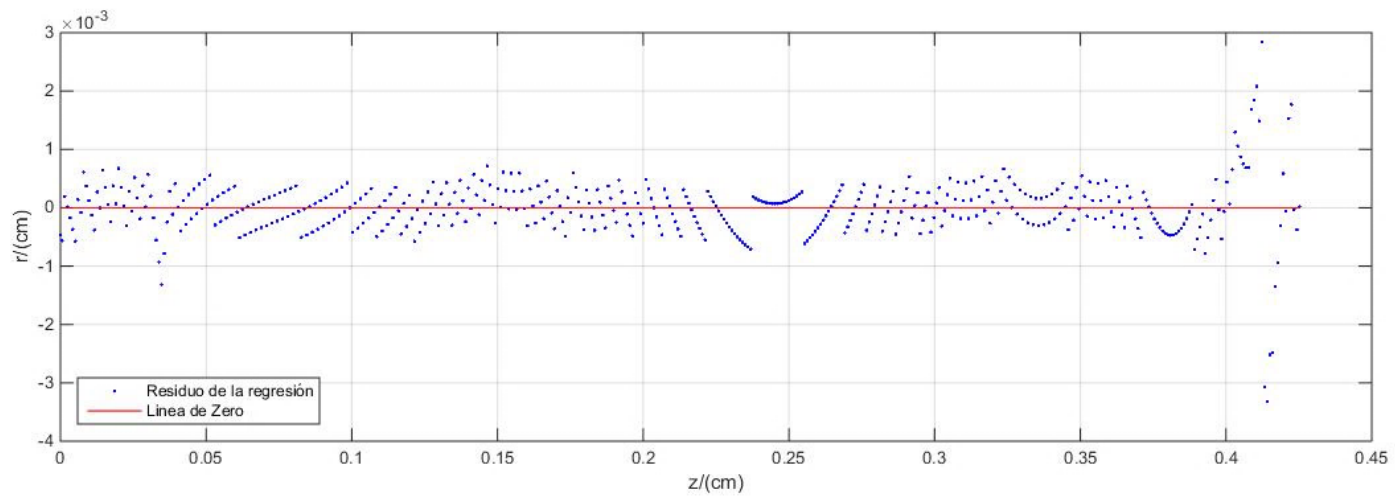
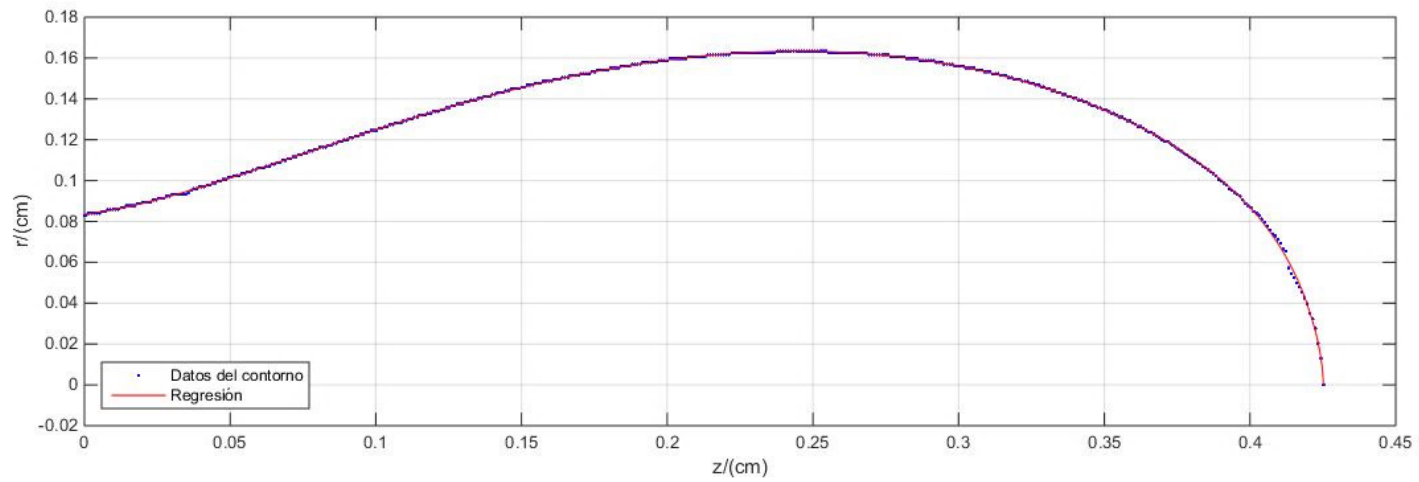


Figura B.13 Regresión y residuos de la regresión del perfil de la burbuja

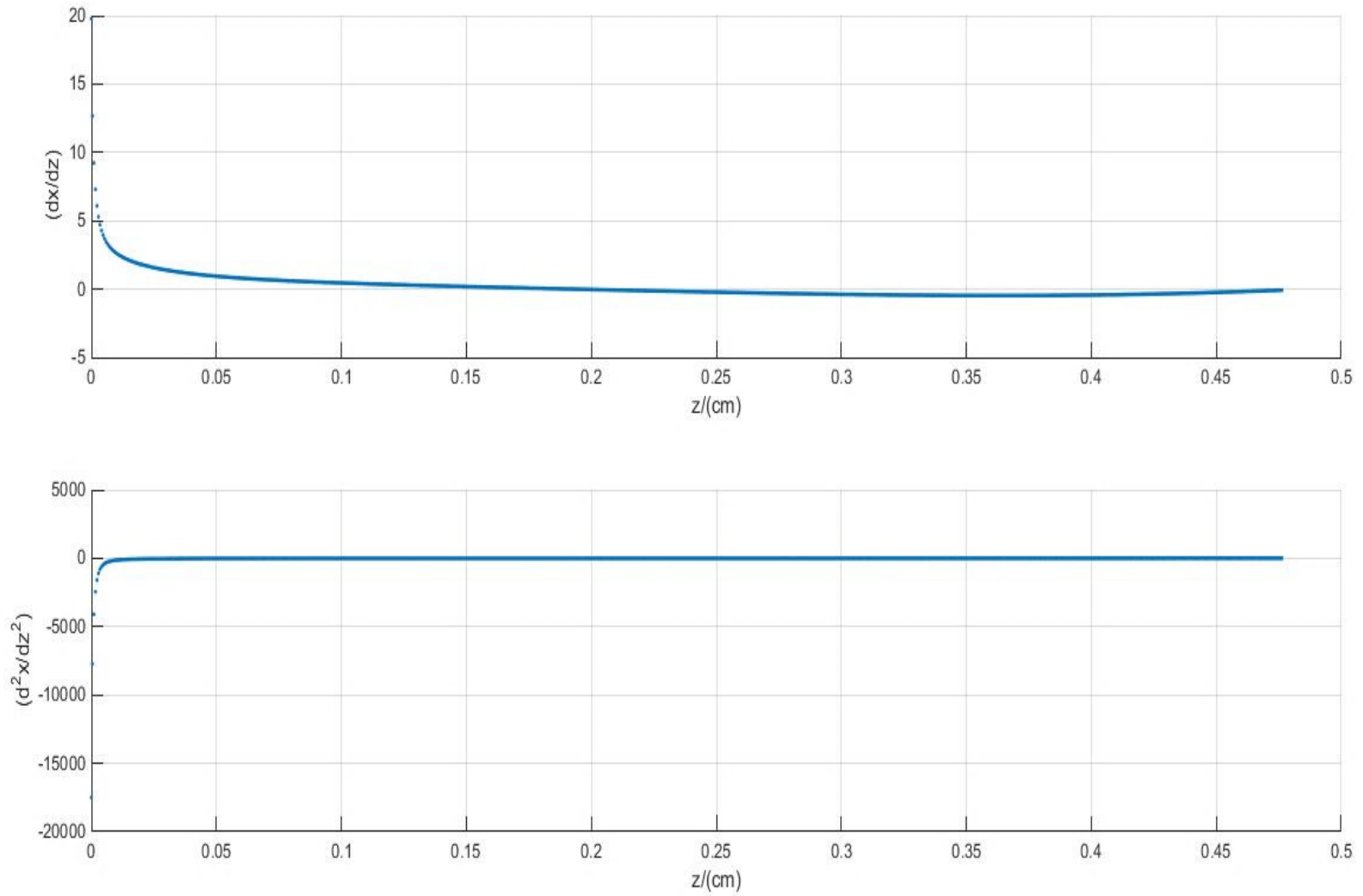


Figura B.14 Primera y segunda derivada de la función obtenida mediante la regresión del perfil de la burbuja

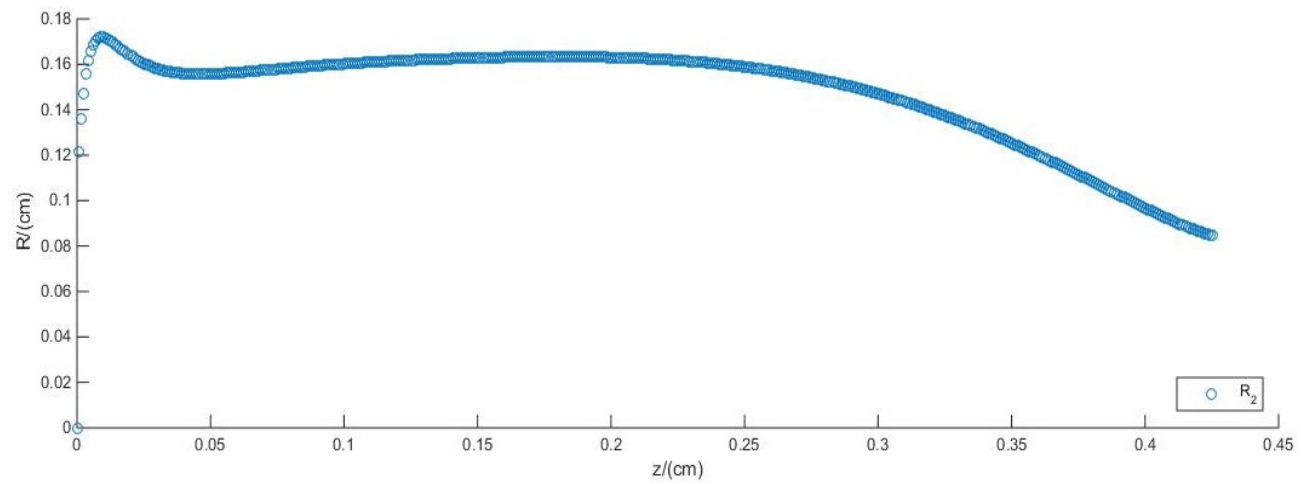
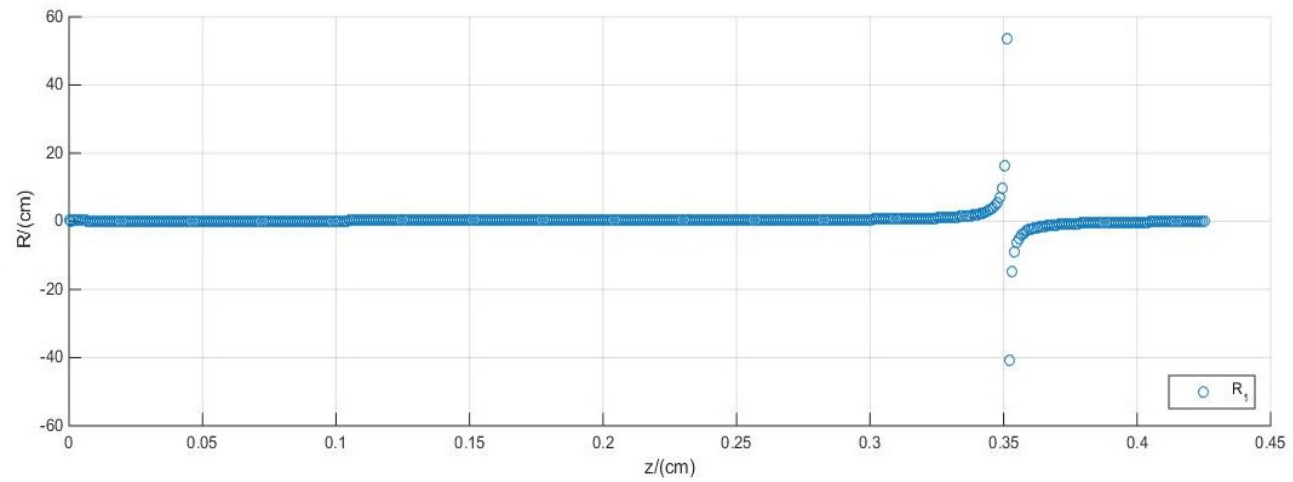


Figura B.15 Radios de curvatura conforme el perfil de la burbuja

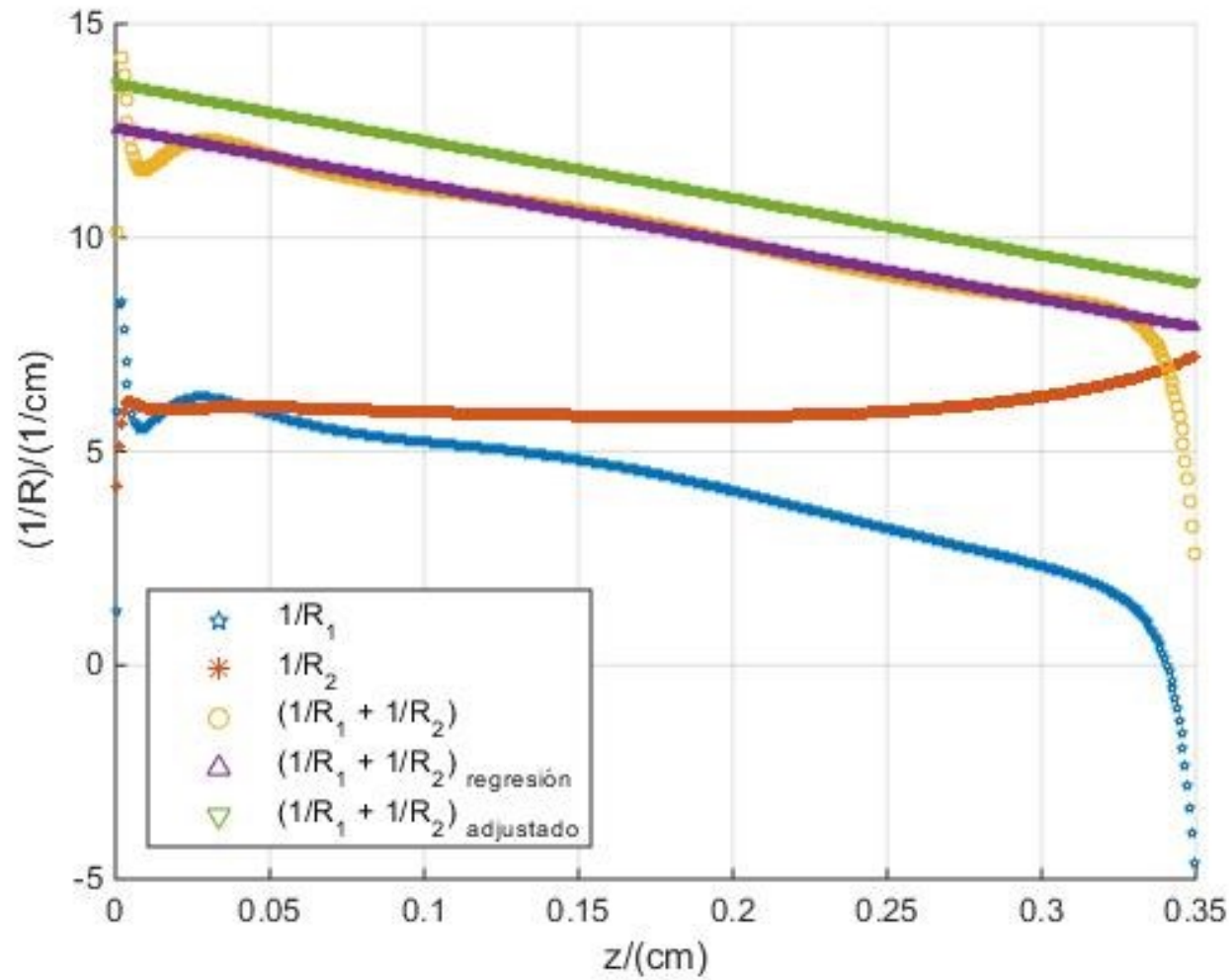


Figura B.16 Radios de curvatura inversos, suma de ambos radios de curvatura inversos, regresión lineal de la suma de los radios de curvatura inversos y ajuste de la regresión conforme al radio de curvatura en el ápice (R_0)

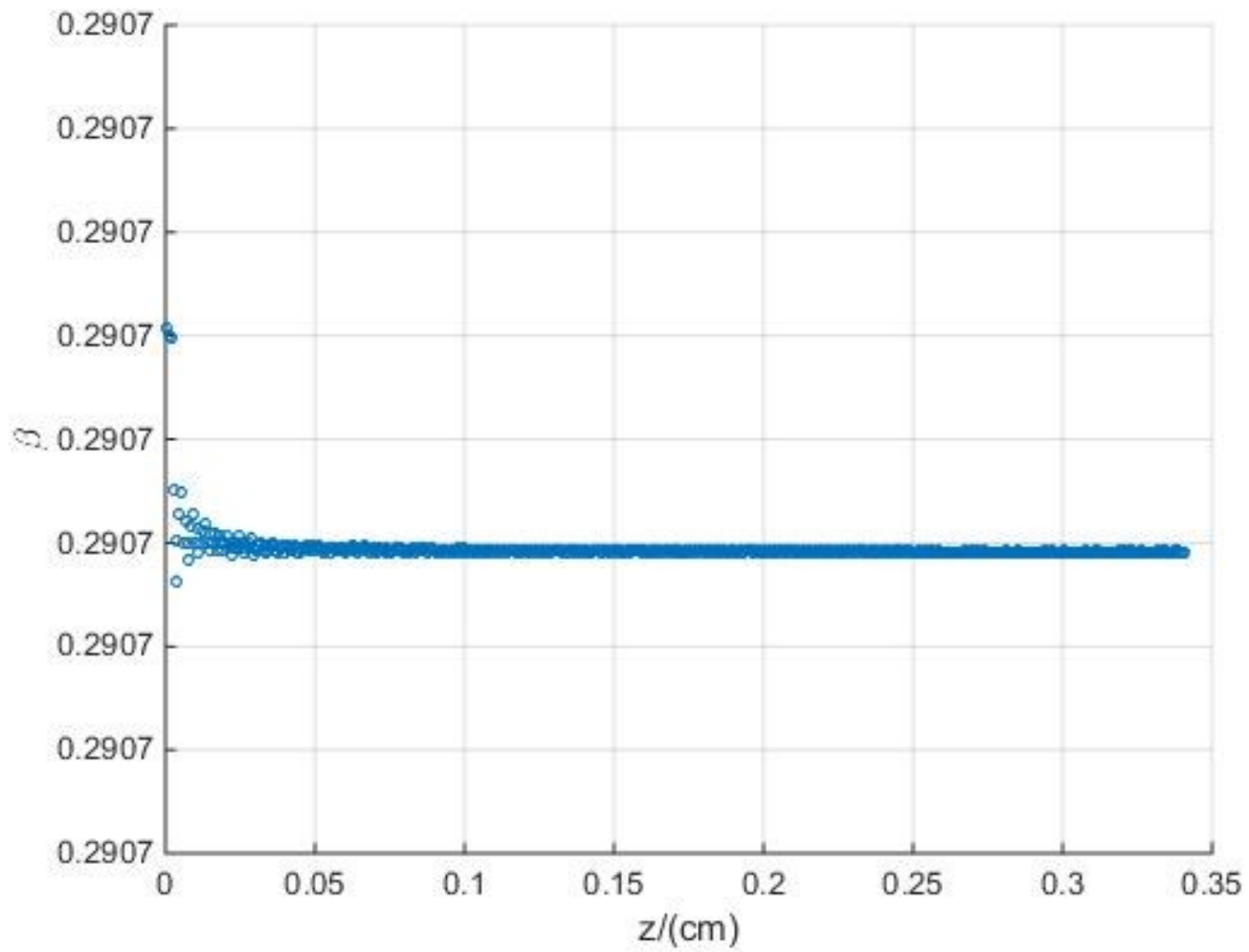


Figura B.17 Determinación del factor β conforme la altura de la burbuja

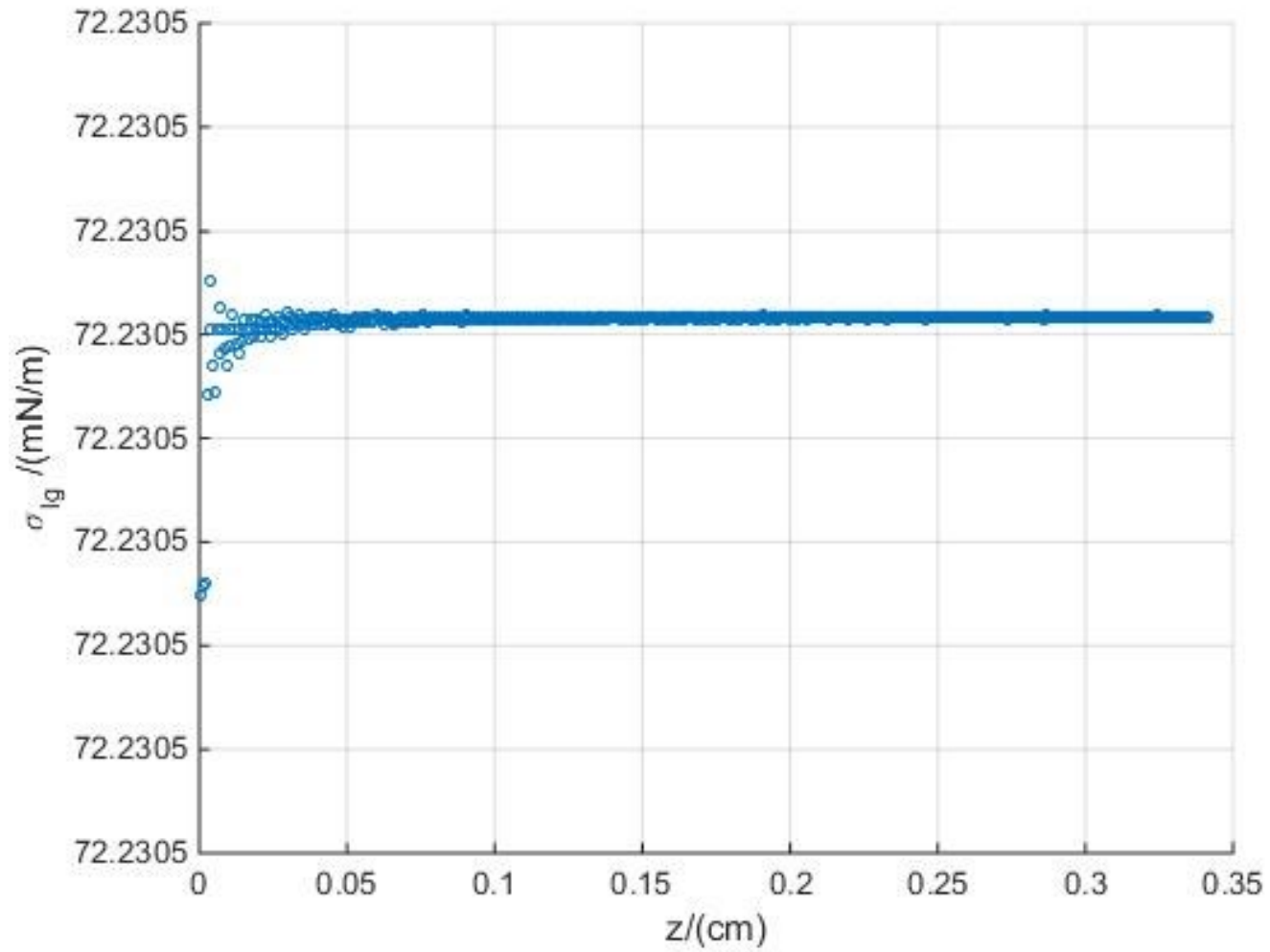


Figura B.18 Tensión superficial conforme la altura de la burbuja

Índice de Tablas

Tabla 6.1 Incrementos iónicos individuales de tensión superficial a bajas concentraciones (Marcus, 2016).....	67
Tabla 6.2 Número de hidratación de los iones de electrolito (Marcus, 2016).....	68
Tabla 6.3 Radio de iones, $R_0 +$ y $R_0 -$, en Angstroms, Å (Slavchov y Novev, 2012).....	69
Tabla 8.1 Parámetros tomados en cuenta durante la experimentación	84
Tabla 8.2 Comparación entre la celda construida y un equipo comercial mediante el método de burbuja ascendente, TS, tensión superficial y Volumen, V.....	88
Tabla 8.3 Comparación entre la celda construida y un equipo comercial mediante el método de gota pendiente.....	88
Tabla 8.4 Promedio de tensión superficial por experimento con agua desionizada (crecimiento de burbuja, C.B., tiempo de envejecimiento, T.E.).....	95
Tabla 8.5 Promedios de tensión superficial por experimento de hexanol, octanol y decanol a diferente temperatura	100
Tabla 8.6 Promedios de tensión superficial por experimento de soluciones de NaCl a diferentes concentraciones y soluciones de KCl y CaCl ₂ 1.0 M a 25°C. (crecimiento de burbuja, C.B., tiempo de envejecimiento, T.E., luces del laboratorio encendidas, L.E). (1) Soluciones de NaCl elaboradas con el bote con No. de lote 71629, (2) Soluciones de NaCl elaboradas con el bote con No. de lote 71631	106
Tabla 8.7 Promedio de la medición de tensión superficial de soluciones de NaCl, KCl y CaCl ₂ a una concentración de 1.0 M mediante el método 1 y el método 2 mediante el crecimiento cuasi-estático de burbuja y tiempo de envejecimiento	117
Tabla 9.1 Diferencia porcentual entre los valores experimentales de tensión superficial del agua a diferentes temperaturas y los valores de referencia (crecimiento de burbuja, C.B. y tiempo de envejecimiento, T.E.).....	128
Tabla 9.2 Diferencia porcentual entre los valores experimentales promedio de tensión superficial de hexanol, octanol y decanol a diferentes temperaturas y los valores de referencia	131
Tabla 9.3 Diferencia porcentual absoluta mínima y máxima entre los valores experimentales de tensión superficial de octanol y decanol a diferentes temperaturas y los valores de referencia.....	134
Tabla 9.4 Diferencia porcentual entre la tensión superficial de soluciones electrolíticas y la referencia calculada mediante tablas.....	135
Tabla 9.5 Diferencia porcentual absoluta mínima y máxima entre los valores experimentales de tensión superficial de disoluciones de NaCl a diferentes concentraciones y soluciones de KCl y CaCl ₂ a una concentración 1.0 M	141

Índice de Gráficas

Gráfica 6.1 Densidad de alcoholes lineales (1-alcoholes) a diferentes temperaturas (Cano Gómez, 2013; Saleh, Akhtar, Begum, Ahmed, y Begum, 2004).....	63
Gráfica 6.2 Variación de la tensión superficial conforme a la temperatura y el número de carbonos de alcoholes lineales (Wohlfarth y Wohlfarth, 1997).....	65
Gráfica 8.1 Crecimiento cuasi-estático de una burbuja de hexanol a 10°C.....	86
Gráfica 8.2 Crecimiento cuasi-estático de una burbuja en una solución de NaCl 2.0 M a 25°C.....	87
Gráfica 8.3 Experimentación 2 Agua a 25°C. Crecimiento de burbuja cuasi-estático y escala de grises. Agosto.....	90
Gráfica 8.4 Experimentación 1 Hexanol a 10°C. Tiempo de envejecimiento y escala de grises.....	91
Gráfica 8.5 Experimentación 3 NaCl 1.0 M a 25°C. Solución 1, crecimiento de burbuja cuasi-estático, escala de grises y luces del laboratorio apagadas.....	92
Gráfica 8.6 Determinación del ángulo, volumen y altura de la burbuja de la experimentación 2.2 CaCl ₂ 1.0 M a 25°C.....	93
Gráfica 8.7 Promedios de la tensión superficial del agua obtenida mediante la celda y el Método 1 a diferentes temperaturas. Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 23.....	98
Gráfica 8.8 Promedios de tensión superficial del agua obtenida mediante la celda y el Método 2 a diferentes temperaturas. Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 23.....	98
Gráfica 8.9 Promedios de tensión superficial del agua obtenida mediante la celda y el Método 1 a 25°C en diferentes periodos. Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 23.....	99
Gráfica 8.10 Promedios de tensión superficial del agua obtenida mediante la celda y el Método 2 a 25°C en diferentes periodos. Valores de referencia tomados de Wohlfarth y Wohlfarth (1997) página 23.....	99
Gráfica 8.11 Promedios de la tensión superficial del hexanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 1.....	103
Gráfica 8.12 Promedios de la tensión superficial del hexanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 2.....	103
Gráfica 8.13 Promedios de la tensión superficial del octanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 1.....	104
Gráfica 8.14 Promedios de la tensión superficial del octanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 2.....	104
Gráfica 8.15 Promedios de la tensión superficial del decanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 1.....	105
Gráfica 8.16 Promedios de la tensión superficial del decanol obtenida mediante la celda a diferentes temperaturas mediante el Método 2.....	105
Gráfica 8.17 Densidad de soluciones de NaCl conforme a la concentración.....	113
Gráfica 8.18 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución 1 de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 1.....	114

Gráfica 8.19 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución 1 de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 2	114
Gráfica 8.20 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución 2 de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 1	115
Gráfica 8.21 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución 2 de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 2	115
Gráfica 8.22 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución (1) y (2) de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 1	116
Gráfica 8.23 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución (1) y (2) de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 2.....	116
Gráfica 8.24 Promedios de la tensión superficial obtenida mediante la celda con la Solución (1) y (2) de NaCl a diferentes concentraciones mediante el Método 1 y el Método 2.....	117
Gráfica 9.1 Visualización de las estimaciones de tensión superficial mediante los tres métodos propuestos en la experimentación 1 de KCL 1.0 M.....	126

Índice de Figuras

Figura 1.1 Empaquetamiento molecular en dos dimensiones (Birdi, 2009, p. 11)	12
Figura 1.2 Fuerzas atractivas en el seno de un líquido y en la superficie. Tomado de Osorio (1998, p. 2)	12
Figura 2.1 Diagrama de un cuerpo con simetría axial (gota o burbuja).....	20
Figura 2.2 Diagrama de un área diferencial sobre la curva. a) La línea negra continua es una sección de la curva y b) la línea intermitente en color rojo es la aproximación de una recta.....	22
Figura 2.3 Diagrama de un círculo de radio R.....	27
Figura 4.1 Esquema de algunas configuraciones experimentales para medir la tensión superficial dinámica. (1) Método de la placa de Wilhelmy (se mide F (fuerza), h (ascenso capilar en la pared) y θ (ángulo de contacto dinámico); (2) Método de Anillo de Du Noüy; (3) Método de gota pendiente; (4) Método de burbuja emergente; (5) Método de gota sésil; (6) Método de burbuja cautiva; (6') Método de burbuja cautiva de Schürch y colaboradores; (7) Método de burbuja o gota giratoria; (8) Método de presión máxima de burbuja (se mide p_1); (9) Método de burbuja (se mide $p_1 - p_2$; el modo de área constante se expresa con línea continua, y el área variable o modo de burbuja pulsante, entre la línea continua y la línea discontinua); (10) Método de crecimiento de gota; (11) Método de peso o volumen de gota; (12) Método de chorro oscilante (a y c representan secciones transversales que son elipses con sus ejes mayor y menor intercambiados; b y d representan secciones transversales que son círculos, y λ es la longitud de onda); 13) Método de placa inclinada (la tensión se mide con una placa de Wilhelmy). Figura tomada de Franses y col. (1996).....	36
Figura 4.2 Esquema del método del anillo de Du Noüy	38
Figura 4.3 Esquema del Plato de Wilhelmy (Gijsenbergh y Puers, 2018)	39
Figura 5.1 Radios de curvatura en dos puntos diferentes a lo largo de la curva (Lesage y Marois, 2013)	45

Figura 5.2 (a) Radios de curvatura, R_1 y R_2 , (b) Fuerzas que actúan sobre una superficie diferencial.....	45
Figura 5.3 Diagrama de una burbuja en un sistema coordenado.....	49
Figura 5.4 Esquemática (a) y (b) de las fuerzas efectivas sobre un segmento diferencial de burbuja simétrica a lo largo del eje vertical (Vafaei y Wen, 2015).....	52
Figura 5.5 (a) Crecimiento de una burbuja a partir de un capilar sumergido. (b) Fuerzas que actúan sobre la burbuja, F_b es la fuerza de flotabilidad, F_P es la fuerza debido a la presión, F_σ es la fuerza de capilaridad y F_d es la fuerza dinámica (S. Di Bari y col., 2013)	53
Figura 5.6 Diagrama de gota pendiente (Fordham, 1948).....	59
Figura 6.1 Modelo de las moléculas de agua que rodean un electrolito en un microaspecto (Yuan y col., 2018)	68
Figura 6.2 Modelo de hidratación en un macroaspecto (Yuan y col., 2018).....	68
Figura 7.1 Diagrama de la celda a validar: (a) mirilla de cuarzo, recipiente interno para recepción del líquido a evaluar, zona para baño de agua y (b) celda armada	71
Figura 7.2 Capilar de vidrio utilizado dentro de la celda	72
Figura 7.3 Celda utilizada durante la experimentación con el capilar previamente montado	72
Figura 7.4 (a) Superficie del capilar sin pulir, (b) Superficie del capilar pulido	73
Figura 7.5 Diagrama del equipo utilizado para determinar la tensión superficial mediante el método de burbuja ascendente: (1) Computadora portátil, (2) cámara de alta definición, (3) luz led color blanco, (4) tornillo micrométrico, (5) jeringa, (6) manguera de hule, (7) capilar de vidrio, (8) celda de acrílico con mirilla de cuarzo y (9) termómetro	73
Figura 7.6 Arreglo de la celda y los elementos periféricos durante la experimentación	74
Figura 7.7 Ajustes de calidad de imagen y parámetros de salida de imagen	75
Figura 7.8 Ajuste del número de fotografías e intervalos de tiempo entre exposiciones....	76
Figura 7.9 Disposición de la cámara y la celda sobre la estructura de aluminio.....	77
Figura 8.1 Vista del crecimiento cuasi-estático de una burbuja de aire a partir de un capilar sumergido en agua sin una alineación precisa entre el eje focal de la cámara y el capilar con un orificio tipo cono.....	84
Figura 8.2 Vista panorámica del crecimiento cuasi-estático de una burbuja de aire a partir de un capilar sumergido en agua con el eje focal de la cámara y el capilar con orificio tipo recto alineados adecuadamente.....	85
Figura 8.3 Equipo <i>Attension Theta Lite</i>	89
Figura 9.1 Sistema de sellado entre la jeringa y la manguera de hule, (1) manguera por donde fluye el aire desde la jeringa, (2) manguera de conexión entre la jeringa y el capilar, (3) capuchón de hule.	123
Figura 9.2 Imagen tomada en un ángulo diferente a 180° , con la luz del laboratorio encendida, sin ajustes en la toma de imagen, sin filtro y capilar con orificio de salida tipo cono y solución de silicón en su superficie sin pulir.....	123
Figura 9.3 Imagen tomada en un ángulo aproximado a 180° , con la luz del laboratorio apagada, con ajustes en los parámetros de salida de imagen, con filtro y capilar con orificio de salida recto, sin solución de silicón en su superficie y superficie pulida	123
Figura A.1 Plano de la celda y corte AA' en milímetros. La zona sombreada corresponde al espacio que ocupa el líquido dentro de la celda	152
Figura A.2 Diagrama del capilar utilizado y medidas en milímetros.....	153
Figura B.1 Imagen tomada con la cámara	154

Figura B.2 Imagen binaria	154
Figura B.3 Imagen binaria inversa	154
Figura B.4 Primera extracción de áreas blancas	155
Figura B.5 Inversión de colores y segunda extracción de áreas blancas	155
Figura B.6 Extracción del contorno de la burbuja con capilar	156
Figura B.7 Puntos coordenados del contorno del capilar y la burbuja dentro de la imagen	157
Figura B.8 Puntos coordenados del perfil de la burbuja dentro de la imagen	158
Figura B.9 Perfil (izquierdo o derecho) del contorno de burbuja y rotación del eje coordenado	159
Figura B.10 Regresión del ápice de la burbuja.....	160
Figura B.11 Primera y segunda derivada de la función obtenida mediante la regresión en el ápice de la burbuja	161
Figura B.12 Radios de curvatura en el ápice de la burbuja.....	162
Figura B.13 Regresión y residuos de la regresión del perfil de la burbuja.....	163
Figura B.14 Primera y segunda derivada de la función obtenida mediante la regresión del perfil de la burbuja	164
Figura B.15 Radios de curvatura conforme el perfil de la burbuja	165
Figura B.16 Radios de curvatura inversos, suma de ambos radios de curvatura inversos, regresión lineal de la suma de los radios de curvatura inversos y ajuste de la regresión conforme al radio de curvatura en el ápice (R_0)	166
Figura B.17 Determinación del factor β conforme la altura de la burbuja	167
Figura B.18 Tensión superficial conforme la altura de la burbuja.....	168

Simbología

α	Factor de corrección del Anillo del Du Noüy	Å	Angstrom
β	Factor de (Andreas y col., 1937)	B_o	Número de Bond
γ	Tensión interfacial	C_1	$\sum \mu_i n_i = cte$
$\Delta\rho$	Diferencia de densidad	C_2	$C_1 - p'V$
Δp	Diferencia entre la presión interna y externa de la burbuja o gota.	Ca	Número Capilar
Δp_c	Corrección atribuida a efectos hidrodinámicos	d_e	Diámetro del ecuador de la burbuja o gota
Δp_m	Diferencia medida entre la presión interna y externa de la burbuja	$d_s = d_{10}$	Diámetro equivalente de la burbuja o gota, a una altura igual a d_e
θ	Ángulo formado entre la recta tangente a la curva y el eje horizontal x	d_n	Diámetro equivalente a una altura "n"
θ_0	Ángulo formado entre la base de la burbuja o gota con respecto al capilar	F	Fuerza
$\theta(t)$	Ángulo de contacto dinámico	F_σ	Fuerza debida a la tensión superficial
μ	Viscosidad	F_b	Fuerza de flotabilidad
μ_i	Potencial químico de la sustancia i	F_D	Fuerzas verticales dinámicas
π	Pi = 3.1416	F_E	Fuerzas eléctricas inducidas
ρ_g	Densidad del gas	F_N	Agrupación de fuerzas verticales dinámicas sobre la burbuja
ρ_l	Densidad del líquido	F_p	Fuerza debida a la presión
σ	Tensión superficial	$F(t)$	Fuerzas dinámicas
σ_e	Tensión superficial en equilibrio	$f(x, z, z_x)$	Funcional que depende de x, z y z_x
σ_{lg}	Tensión superficial en la interfase líquido-gas	g	Aceleración de la gravedad
$\sigma(t)$	Tensión superficial dinámica	G	Energía libre de Gibbs
a	Área	h	Altura de un punto de la burbuja a la superficie (cabeza hidrostática)
A	Energía libre de Helmholtz	h_0	Altura del ápice de la burbuja a la superficie

H	Altura entre la base de la burbuja y la superficie del líquido	p_l	Presión ejercida por el líquido sobre la burbuja
H	Entalpía	p_h	Presión hidrostática
H	Relación entre el diámetro del ecuador y el radio de curvatura equivalente	p_{ld}	Componentes de presión dinámicos
k_i	Incrementos individuales de tensión superficial, para iones acuosos a condiciones ambientales y bajas concentraciones	p_{le}	Componentes de presión eléctricos
ℓ	Línea de contacto o perímetro mojado	p_{ls}	Agrupación de términos hidrostáticos
l	Largo de la placa de Wilhelmy	p_{max}	Presión máxima de burbuja
L_{cap}	Longitud capilar	r_0	Radio del orificio del capilar
m	Metro	r_m	Radio de la burbuja igual a la altura z_m
M	Molar, $\left(\frac{mol}{L}\right)$	R	Radio de la burbuja
mN	Milnewton	R_0	Radio de curvatura equivalente o radio de curvatura en el ápice.
n	Porción de d_e tomado que determina la altura de d_n	R_0^*	Radio equivalente normalizado mediante L_{cap}
\mathbf{n}	Vector de unidad normal exterior	R_0^*	Radio equivalente normalizado basado en el número de Bond
n_i	Cantidad de materia de la sustancia i	R_1	Radio de curvatura 1
p	Presión	R_2	Radio de curvatura 2
p'	Presión externa de la burbuja o gota	R_{0+}	Radio de cationes
p''	Presión interna de la burbuja o gota	R_{0-}	Radio de aniones
p_0	Presión atmosférica	R_a	Radio del anillo de Du Noüy
p_σ	Presión debida a la tensión superficial	S	Relación de diámetros
p_{atm}	Presión atmosférica	S	Entropía
p_g	Presión del gas dentro de la burbuja	t	Tiempo
$p_{g,0}$	Presión del gas en el ápice de la burbuja	\mathbf{t}	Vector de unidad normal tangente
$p_{g,s}$	Presión del gas en el orificio del capilar	T	Temperatura

T	Tensor de tensión viscoso	X	x normalizada mediante R_0
V_m	Volumen tomado desde el ápice de la burbuja al punto z_m	X^*	x normalizada mediante L_{cap}
u	Velocidad de caída de gota o ascenso de burbuja	X^{**}	x normalizada basado en el número de Bond
U	Energía interna	z_x	$\left(\frac{dz}{dx}\right)$
V	Volumen	z_{xx}	$\left(\frac{d^2z}{dx^2}\right)$
V'	Volumen externo de la burbuja o gota	Z	z normalizada mediante R_0
V''	Volumen interno de la burbuja o gota	Z^*	z normalizada mediante L_{cap}
w	Ancho de la placa de Wilhelmy	Z^{**}	z normalizada basado en el número de Bond
W	Trabajo	z_m	Altura de la burbuja igual al radio
x	Coordenada horizontal	Z_n	Altura "n" del diámetro equivalente