

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TENSIÓN INTERFACIAL DEL
SISTEMA N-ALCANO/AGUA EN CONDICIONES ISOBÁRICAS Y AUMENTO
GRADUAL DE LA TEMPERATURA EMPLEANDO EL EQUIPO
-DROP SHAPE ANALYZER DSA100HP-**

**JUAN FELIPE GALVIS CUELLAR
CAMILO ANDRÉS GUERRERO MARTIN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2016**

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TENSIÓN INTERFACIAL DEL
SISTEMA N-ALCANO/AGUA EN CONDICIONES ISOBÁRICAS AUMENTO
GRADUAL DE LA TEMPERATURA EMPLEANDO EL EQUIPO -DROP
SHAPE ANALYZER DSA100HP-**

**JUAN FELIPE GALVIS CUELLAR
CAMILO ANDRÉS GUERRERO MARTIN**

**Trabajo de investigación presentado para optar por el título de Ingeniero de
petróleos**

**Director:
ERIK MONTES PAEZ M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2016**

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1.FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL.....	15
1.1. HIDROCARBUROS	15
1.1.1. Propiedades físicas de los alcanos.....	17
1.1.2. Propiedades químicas de los alcanos.....	18
2. TENSIÓN SUPERFICIAL.....	19
2.1. TENSIÓN INTERFACIAL.....	22
2.1.1. Ángulo de contacto	23
2.1.2. Capilaridad.....	24
3. MEDICIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL	26
3.1. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL Y/O INTERFACIAL.....	27
3.1.1. Método de Wilhelmy-Plate (líquido-líquido y líquido-gas).	27
3.1.2. Método del anillo de Du Nuoy.....	29
3.1.3. Método del peso de la gota o volumen de la gota (líquido-líquido y líquido gas).....	29
3.1.4. Método de la presión máxima de la burbuja.	30
3.1.5. Método de la gota giratoria.	30
3.1.6. Método de la gota sésil o yacente.....	30
4. MÉTODO DE LA GOTA COLGANTE	32
4.1 MODELO MATEMÁTICO: ECUACIÓN DE LAPLACE-YOUNG	33
4.2. ANÁLISIS DE LA FORMA DE LA GOTA EJE-SIMÉTRICA ADSA	34
4.3. VENTAJAS DEL ANÁLISIS ADSA.....	35
4.4. PARÁMETROS DE AFECTACIÓN DE LA MEDICIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL USANDO EL ANÁLISIS ADSA PARA EL MÉTODO DE LA GOTA COLGANTE	35
4.5. PARÁMETRO DE LA FORMA DE LA GOTA.....	39
4.6. LA VIBRACIÓN COMO PARÁMETRO DE AFECTACIÓN DEL MÉTODO ADSA 50	
5. MÉTODOS EXPERIMENTALES	52

5.1. MATERIALES Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	52
5.2. EQUIPO Y PROCEDIMIENTO	54
6. ANÁLISIS DE DATOS	58
6.1. TRATAMIENTO DE DATOS.....	58
6.1.1. Sistemas (n-decano + agua) y (n-heptano + agua).....	58
6.1.2. Sistema (decano + (agua + 3%NaCl))	61
6.2. ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DEL ERROR.	63
6.3. OBSERVACIONES, RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
6.4. COMPARACIÓN CON OTROS AUTORES.....	68
6.4.1. Sistema n-heptano/agua.....	68
6.4.2. Sistema n-decano/agua	70
7. CONCLUSIONES	71
8. RECOMENDACIONES.....	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
ANEXOS.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación general de los hidrocarburos.....	15
Figura 2. Estructura atómica de los alcanos.	16
Figura 3. Propiedades de los alcanos de acuerdo al número creciente de átomos de carbono.	18
Figura 4. Insecto encima de la superficie del agua debido a la tensión superficial.	19
Figura 5. Ilustración de las fuerzas intermoleculares en el seno de un fluido (agua).	21
Figura 6. Relación entre la tensión superficial del agua y la temperatura.	21
Figura 7. Comparación entre Tensión superficial entre diferentes fluidos.....	22
Figura 8. Ilustración del ángulo de contacto entre un líquido y una superficie mojante.	24
Figura 9. Fenómeno de capilaridad en el agua.	25
Figura 10. Medición de la tensión superficial de un líquido a través del método de la placa.	28
Figura 11. Medición de la tensión interfacial entre dos líquidos a través del método de la placa.	28
Figura 12. Diagrama de cuerpo libre del anillo de DuNoy.....	29
Figura 13. Perfil de una gota sésil.....	31
Figura 14. Observación de los diferentes radios de un perfil de gota colgante en el sistema cartesiano.	32
Figura 15. Montaje experimental de un análisis ADSA para el método de la gota suspendida.	34
Figura 16. Visualización del cambio de la curvatura adimensional (Bd) de la gota como función del número de Bond y del Volumen adimensional.....	38
Figura 17. Comparación entre distintas formas de gota colgante realizando variaciones de radios de soporte, tensión superficial y número de Bond.	39
Figura 18. Comportamiento del parámetro de forma Pc de acuerdo a variaciones del número de Bond y el volumen adimensional.....	42
Figura 19. Comportamiento lineal decreciente del volumen máximo adimensional de la gota colgante como función del número de Bond.	43
Figura 20. Comportamiento del ángulo Aparente de contacto en función del número de Bond.	45
Figura 21. Visualización de formas de gotas colgantes de acuerdo a variaciones de número de Bond, Volumen adimensional y parámetro de forma.	46
Figura 22. Observación de perfiles de gota de acuerdo a cambios en el número de Bond en el método de la gota sésil.	47

Figura 23. Relación entre el número de Bond, el volumen adimensional y la curvatura adimensional para el método de la gota sésil.	48
Figura 24. Valores de parámetros de forma máximos en función del número de Bond.	49
Figura 25. Volumen de gota en función del tiempo de permanencia en tres ambientes vibro-acústicos distintos. Fuente: (Álvarez, Díaz, & Pérez, 2010)	51
Figura 26. Implementos utilizados L-RAP/UFRJ.	53
Figura 27. Equipo usado para la medición de tensión interfacial y ángulo de contacto. 1. Cilindro de Nitrógeno. 2. Celdas de descarga. 3. Celda de presión fluido 4. Celda de presión fluido 5. Medidor y calibrador de temperatura 6. Unidad de observación microscópica 7. Celda de confinamiento fluido 8. Celda de confinamiento fluido 9. Tubo capilar 10. Tubería de escape 11. Tubería alimentadora de la célula.	54
Figura 28. Esquema Drop Shape Analyzer.	55
Figura 29. Imágenes del software Kruss, Zona de contacto calculada IFT 2. Boquilla DSA.	57
Figura 30. Variación de la densidad del agua con respecto a la temperatura. ..	58
Figura 31. Variación de la densidad de un n-alcano con respecto a la temperatura. Fuente. Los autores	59
Figura 32. Eliminación de los valores retirados cuatro puntos porcentuales de la media. Fuente: Los autores	60
Figura 33. Flujo de trabajo en el tratamiento de datos.	61
Figura 34. Variación de la densidad con respecto al tiempo con relación a la concentración de salmuera disuelta en Agua. Fuente: Schlumberger	62
Figura 35. Variación de la densidad con respecto al tiempo con relación a tres por ciento de salmuera disuelta en Agua.	62
Figura 36. Análisis de propagación del error para el sistema n-decano/agua. ...	63
Figura 37. Análisis de propagación del error para el sistema n-decano/agua contaminada.	64
Figura 38. Análisis de propagación del error para el sistema n-heptano/agua.	64
Figura 39. Valores de la tensión interfacial a diferentes temperaturas.	66
Figura 40. Comparación con otros autores sistema Heptano/Agua.	69
Figura 41. Comparación con otros autores sistema Heptano/Agua.	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseño experimental	52
Tabla 2. Análisis estadístico de datos.	60
Tabla 3. Valores de IFT VS TEMPERATURA para cada Sistema.....	65
Tabla 4. componentes de la ecuación lineal:.....	66
Tabla 5. Comparación de ecuación de la recta con su respectivo error relativo porcentual	69
Tabla 6. Comparación de ecuación de la recta con su respectivo error relativo porcentual	71

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Metodología para la correcta medición y tratamiento de valores de tensión interfacial, obtenidos a través del DSA.....	76
--	----

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TENSIÓN INTERFACIAL DEL SISTEMA N-ALCANO/AGUA EN CONDICIONES ISOBÁRICAS Y AUMENTO GRADUAL DE LA TEMPERATURA EMPLEANDO EL EQUIPO -DROP SHAPE ANALYZER DSA100HP-*

AUTORES: CAMILO ANDRÉS GUERRERO MARTIN, JUAN FELIPE GALVIS CUELLAR†

PALABRAS CLAVE: Tensión interfacial, sistema n-alcano/agua, temperatura

Dada la complejidad para encontrar nuevas reservas de petróleo, las técnicas de recobro mejorado han ocupado un lugar privilegiado en la investigación y aplicación de programas piloto en diversos países del mundo, en donde las propiedades petrofísicas y la descripción adecuada de los yacimientos han jugado un papel importante; De esta manera la reducción del parámetro de la tensión interfacial es preponderante para el incremento del número capilar (F_v viscosas/ F_c Capilares) y con ello optimizar los procesos de recuperación avanzada de petróleo.

Este trabajo fue llevado a cabo en el equipo *Drop Shape Analyzer DSA100HP*, en donde fueron sometidos a prueba tres sistemas n-alcano/agua (dos con fluidos puros y uno contaminado) manteniendo la presión constante e incrementando gradualmente la temperatura, estos resultados obtenidos son posteriormente tratados mediante un análisis estadístico arrojando valores de tensión interfacial para cada punto térmico.

De esta manera los resultados obtenidos fueron tres ecuaciones que se ajustan perfectamente a la literatura y que fueron validadas empleando la comparación con otros autores, encontrando así valores de coeficiente angular cuyo error relativo porcentual es totalmente satisfactorio, de igual manera se presentó un ajuste óptimo al ser cotejados con valores teóricos extraídos de métodos numéricos.

A su vez, los resultados de esta investigación son: (1) Nuevas correlaciones que describen el comportamiento de la tensión interfacial al ser sometida al aumento de temperatura, (2) más elementos técnicos para validar las fuentes bibliográficas, y (3) una nueva metodología para el cálculo de la tensión interfacial mediante la técnica de gota colgante.

* Trabajo de grado

† Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de petróleos, Director: ING. Erik Montes Páez M.Sc.

ABSTRACT

TITLE: EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE INTERFACIAL TENSION OF THE N-ALKANE / WATER SYSTEMS IN ISOBARIC CONDITIONS AND GRADUAL INCREASE OF TEMPERATURE USING THE -DROP SHAPE ANALYZER DSA100HP- EQUIPMENT[‡]

AUTHORS: CAMILO ANDRÉS GUERRERO MARTIN, JUAN FELIPE GALVIS CUELLAR[§]

KEY WORDS: Interfacial tension, n-alkane/water systems, temperature

Given the complexity to find new reserves of hydrocarbons, enhanced oil recovery techniques have a privileged place in the research and implementation of pilot programs in several countries of the world, where the petrophysical properties and the appropriate description of the reservoirs have an important role. In such a way the reduction of parameter of the interfacial tension is essential in the increase the capillary number (viscous forces/capillaries forces) and thus optimize the EOR processes.

This work was carried out in the *Drop Shape Analyzer DSA100HP* equipment, where was proposed three systems n-alkane/water (two with pure fluids and one with sodium chloride) maintaining constant the pressure and gradually increase the temperature, these results are then processed through a statistical analysis obtained values of interfacial tension for each thermal point.

In this way the results achieve were three equations that are perfectly adjusted to the literature and which were validated using the comparison with other authors, finding values of angle coefficient whose relative error percentage is entirely satisfactory, similarly was presented a setting optimum to be matched with theoretical values extracted from numerical methods.

The results of this study showed that: (1) New correlations that describe the behavior of the interfacial tension to be subjected to the temperature increase, (2) more technical elements to validate the bibliographic sources, and (3) a new methodology for the calculation of the interfacial tension using the technique of pendant drop.

[‡] Undergraduated project

[§] Physic-chemist Engineering Faculty. Petroleum Engineering School, Advisor: ENG. Erik Montes Páez M.Sc.

INTRODUCCIÓN

Dada la complejidad para encontrar nuevas reservas de petróleo, la recuperación terciaria ha ocupado un lugar privilegiado en la investigación y aplicación de programas pilotos en diversos países del mundo; El Factor de recobro puede determinarse como el producto entre la eficiencia de barrido y eficiencia de desplazamiento, siendo esta última una eficiencia de recuperación microscópica y determinada por el balance entre los fenómenos capilares, viscosos y de mojabilidad.

El factor clave para el aumento de la eficiencia de desplazamiento es el número capilar definido por la razón entre las fuerzas viscosas y capilares, es decir que entre mayores fuerzas viscosas, mayor será su potencial para desplazar el crudo residual.

Una forma de alterar el número capilar es modificando la preferencia de la mojabilidad de la formación para que esta sea más mojable por agua, de igual manera es posible modificar el número capilar por la reducción de la tensión interfacial, reflejada en la disminución de la presión capilar. Por consiguiente, encontrar el valor de la tensión interfacial con exactitud es importante puesto que determina la presión necesaria para optimizar el proceso de recuperación.

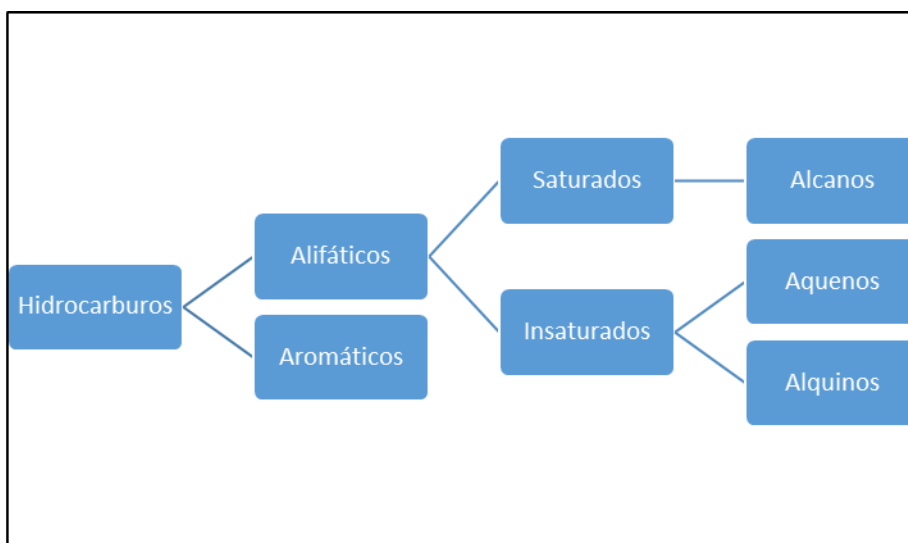
El presente proyecto entrega como resultado este documento que contiene en primera instancia, revisión bibliográfica pertinente al estudio de la tensión interfacial y las técnicas más empleadas para su determinación, a su vez una descripción minuciosa sobre el procedimiento de medición y obtención de datos en el equipo *Drop Shape Analyzer*, así como un análisis completo de los resultados obtenidos, y la validación de estos mediante comparación con otros autores.

1. FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL

1.1. HIDROCARBUROS

Los hidrocarburos son compuestos que tienen solo carbono e hidrógeno. Se pueden clasificar en alifáticos y aromáticos.

Figura 1. Clasificación general de los hidrocarburos.

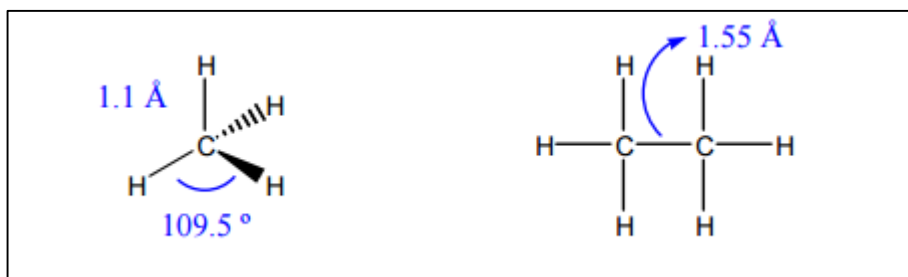


En los tipos de hidrocarburo, los alquenos son hidrocarburos que contienen enlaces dobles carbono-carbono. Se emplea frecuentemente la palabra olefina como sinónimo, mientras que los alquinos son hidrocarburos que contienen enlaces triples carbono-carbono. La fórmula molecular general para alquinos alifáticos es C_nH_{2n-2} y su grado de insaturación es dos. El acetileno o etino es el alquino más simple, fue descubierto por Berthelot en 1862.

En este caso, por propósitos de la investigación se hará hincapié en los alcanos, este tipo de compuestos químicos son los hidrocarburos más simples, no tienen grupo funcional y las uniones entre átomos de carbono (con hibridación sp^3) son enlaces simples. Este tipo de hidrocarburos son muy importantes porque su estudio permite entender el comportamiento del esqueleto de los compuestos orgánicos (conformaciones, formación de radicales) y además porque constituyen una de las fuentes de energía más importantes para la sociedad actual (petróleo y sus derivados) (Universidad Jaume I, 2010).

El átomo de carbono en los alcanos tiene hibridación sp^3 y cada orbital se dirige a los vértices de un tetraedro. Cada orbital forma un enlace con cada H. La longitud del enlace C-H es 1.1 \AA y el ángulo de 109.5° .

Figura 2. Estructura atómica de los alcanos.



Fuente: (Universidad Jaume I, 2010)

Los alcanos pueden presentar cadena lineal, ramificada o cíclica. Cuando los compuestos presentan la misma forma molecular y solamente difieren en el orden en el que se enlazan los átomos en la molécula se les denomina isómeros constitucionales o estructurales.

Por ejemplo, los hidrocarburos n-butano y metil-propano son dos isómeros estructurales con fórmula molecular C_4H_{10} . El monómero n-butano hay dos clases

diferentes de carbonos: los carbonos C1 y C4, con un enlace C-C y tres enlaces C-H, y los C2 y C3, que presentan dos enlaces C-C y dos enlaces C-H. En el 2-metilpropano hay también dos clases diferentes de carbono: los carbonos C1, C3 y C4, similares a los carbonos C1 y C4 del butano puesto que tienen un enlace C-C y tres enlaces C-H, y el carbono C2, que tienen tres enlaces C-C y un enlace C-H. En el butano no hay ningún átomo de carbono con estas características. El número de isómeros crece rápidamente con el número de átomos de carbonos. Así, los alcanos que tienen de 1 a 3 átomos de carbono solamente presentan un isómero, con 4 átomos de carbono son posibles dos isómeros, con 5 átomos 3 isómeros, con 6 átomos 5 isómeros, con 7 átomos 9 isómeros, con 8 átomos 18 isómeros, etc.

1.1.1. Propiedades físicas de los alcanos.

Los alcanos son compuestos no polares, por tal motivo no son solubles en disolventes polares, como el agua. Tienen densidad menor que la del agua. Los alcanos son inodoros, los proveedores de gas natural acostumbran agregarle compuestos como butil-mercaptano que tiene fuerte olor, como manera de prevenir los escapes de gas (Universidad Jaume I, 2010).

A continuación, se muestran distintos alcanos de acuerdo a la cantidad de átomos de carbono, exponiendo su fórmula molecular, nombre número total de isómeros, punto de ebullición y punto de fusión. Se puede observar que el punto de ebullición aumenta con el incremento del número de átomos de carbono.

Figura 3. Propiedades de los alcanos de acuerdo al número creciente de átomos de carbono.

<i>Hidrocarburos normales (cadena lineal)</i>					
Nº de carbonos	Fórmula	Nombre	Nº total de isómeros	p.eb.°C	p.f.°C
1	CH ₄	metano	1	-162	-183
2	C ₂ H ₆	etano	1	-89	-172
3	C ₃ H ₈	propano	1	-42	-187
4	C ₄ H ₁₀	butano	2	0	-138
5	C ₅ H ₁₂	pentano	3	36	-130
6	C ₆ H ₁₄	hexano	5	69	-95
7	C ₇ H ₁₆	heptano	9	98	-91
8	C ₈ H ₁₈	octano	18	126	-57
9	C ₉ H ₂₀	nonano	35	151	-54
10	C ₁₀ H ₂₂	decano	75	174	-30
11	C ₁₁ H ₂₄	undecano		196	-26
12	C ₁₂ H ₂₆	dodecano		216	-10
20	C ₂₀ H ₄₂	eicosano	366319	334	+36
30	C ₃₀ H ₆₂	tricontano	4.11x10 ⁹	446	+66

Fuente: (Universidad Jaume I, 2010)

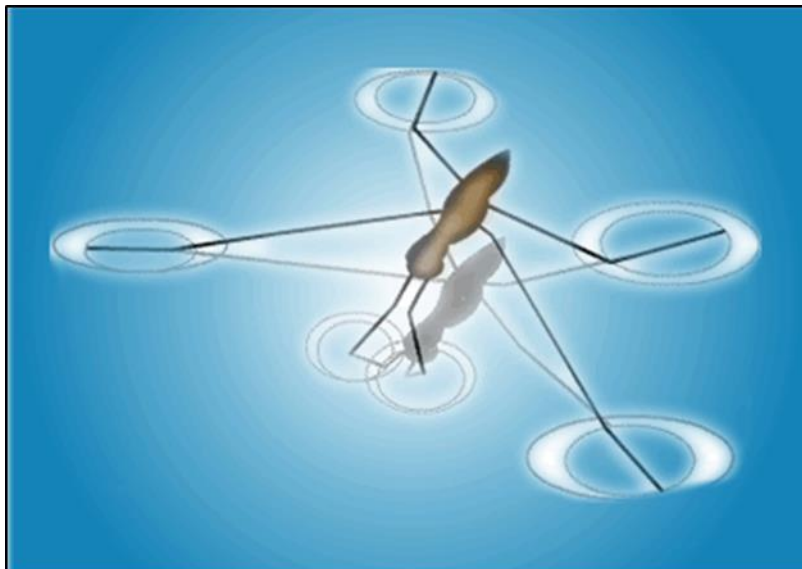
1.1.2. Propiedades químicas de los alcanos.

Estos compuestos hidrocarburos se caracterizan por ser inertes debido a la elevada estabilidad de los enlaces C-C y C-H y a su baja polaridad. Además, No se ven afectados por ácidos o bases fuertes ni por oxidantes como el permanganato. Sin embargo, la combustión es muy exotérmica, aunque tiene una elevada energía de activación.

2. TENSIÓN SUPERFICIAL

En primera instancia, es importante definir una superficie como una capa delgada de dimensiones atómicas o moleculares que constituye la frontera entre dos fases (gas/sólido y gas/liquido), a la que se atribuyen propiedades fisicoquímicas ideales y dichas propiedades difieren a las de la materia en el seno de cada fase, desde el punto de vista macroscópico es la interfaz entre aire/sólido y aire/liquido (Gonzalez, 2014). La tensión superficial es una propiedad de la superficie de un líquido que permite soportar una fuerza externa. Se puede observar, por ejemplo, cuando ciertos insectos se sostienen sobre la superficie del agua e igual ocurre con algunos objetos, como una hoja de afeitar colocada horizontalmente sobre la superficie del líquido, aunque sean más densos que el agua y no pueden flotar (Tamir & Ruiz, 2009).

Figura 4. Insecto encima de la superficie del agua debido a la tensión superficial.

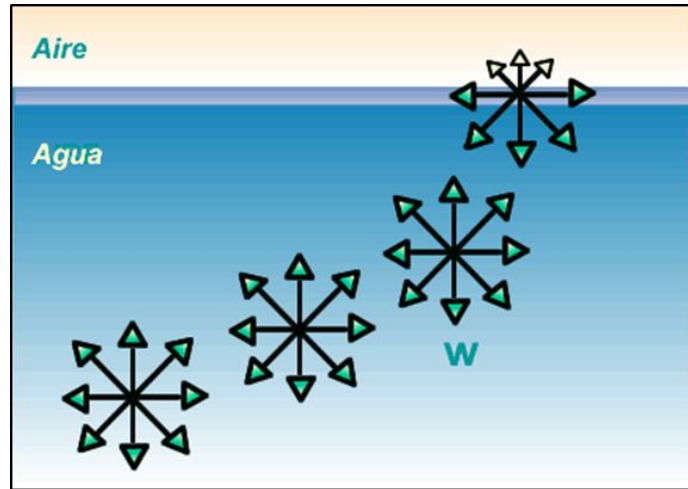


Fuente: (Universidad de Florida, s.f.)

La interfaz no es una superficie bidimensional de volumen nulo, sino que posee un espesor finito y las moléculas en ese volumen finito están sometidas a un campo de fuerzas distinto al que están sometidas las moléculas en el seno del material. Este sistema mostrado está constituido por dos fases: el agua en estado líquido y el agua en estado vapor (gaseoso). La frontera entre las dos fases es la superficie del agua que está en contacto con su vapor, y entre las dos fases existe una región tridimensional intermedia. A esta región tridimensional se le denomina interface.

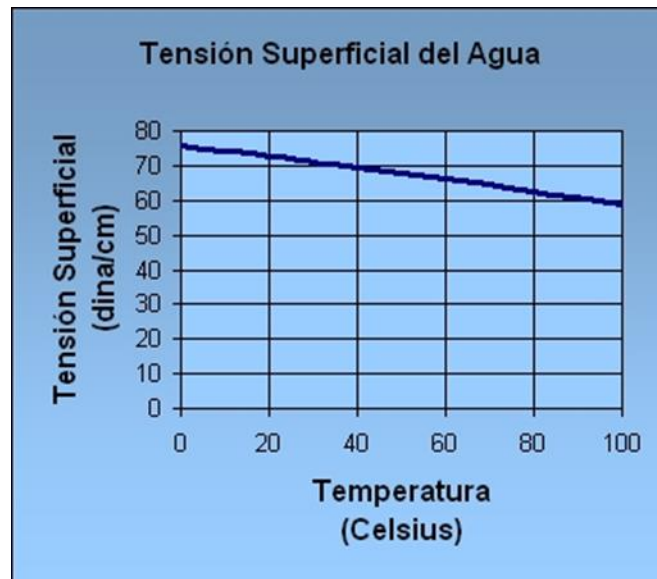
La tensión superficial es causada por los efectos de las fuerzas intermoleculares que existen en la interface. En efecto, esta propiedad depende de la naturaleza del líquido, del medio que le rodea y de la temperatura. Líquidos cuyas moléculas tengan fuerzas de atracción intermoleculares fuertes tendrán tensión superficial elevada (Universidad de Florida, s.f.). En general, la tensión superficial disminuye con la temperatura, ya que las fuerzas de cohesión disminuyen al aumentar la agitación térmica. La influencia del medio exterior se debe a que las moléculas del medio ejercen acciones atractivas sobre las moléculas situadas en la superficie del líquido, contrarrestando las acciones de las moléculas del líquido.

Figura 5. Ilustración de las fuerzas intermoleculares en el seno de un fluido (agua).



Fuente: (Universidad de Florida, s.f.)

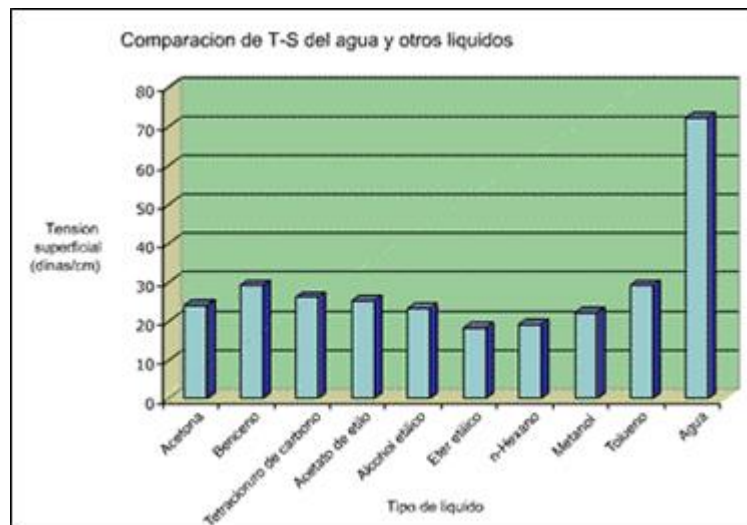
Figura 6. Relación entre la tensión superficial del agua y la temperatura.



Fuente: (Universidad de Florida, s.f.)

En consecuencia, debido a la fuerte atracción que ejercen entre sí las moléculas de agua, este fluido presenta una alta tensión superficial, como lo evidencia la gráfica comparativa a continuación, sin embargo, esta fuerte tensión superficial también se ve afectada por la temperatura, siendo estas dos variables inversamente proporcionales (figura 5).

Figura 7. Comparación entre Tensión superficial entre diferentes fluidos.



Fuente: (Universidad de Florida, s.f.)

2.1. TENSIÓN INTERFACIAL

La tensión interfacial es la fuerza por unidad de longitud requerida para incrementar el área de una interface. Es un fenómeno macroscópico con orígenes microscópicos. En el seno de un líquido, cada molécula está sujeta a fuerzas atractivas y repulsivas ejercidas por moléculas vecinas. Cuando se tiene una mezcla de líquidos inmiscibles o parcialmente miscibles, esas fuerzas se equilibran en

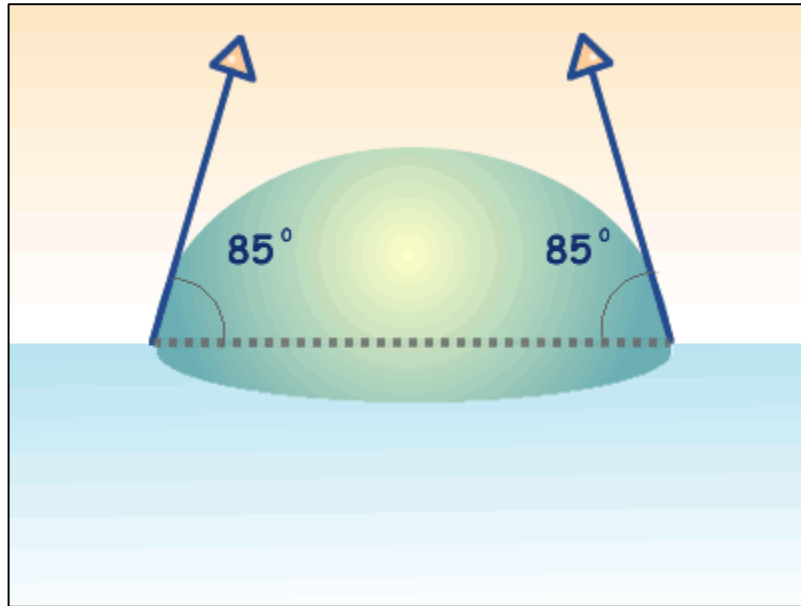
promedio para las moléculas que están lejos de la interface, pero las moléculas que se encuentran cerca de ella, experimentan interacciones altamente repulsivas con las moléculas de la otra fase, lo que genera fuerzas netas de cohesión y la tendencia a moverse hacia el seno de su propia fase. Por otra parte, si entre las moléculas de los dos líquidos predominan las fuerzas atractivas, ellas tenderán a mezclarse (líquidos miscibles) (Mejia, 2009).

En efecto, cuando se tiene dos fluidos en contacto “se tendrán también interacciones de tipo Van der Waals con las moléculas del otro líquido en la interface, lo que conducirá a que la tensión a la interface (tensión interfacial) tenga un valor intermedio entre las tensiones superficiales de los dos líquidos (Anton, 2005).

2.1.1. Ángulo de contacto.

Se refiere al ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con un sólido. El valor del ángulo de contacto depende principalmente de la relación que existe entre las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido y las fuerzas cohesivas del líquido. Cuando las fuerzas adhesivas con la superficie del sólido son muy grandes en relación a las fuerzas cohesivas, el ángulo de contacto es menor de 90 grados, teniendo como resultado que el líquido moja la superficie.

Figura 8. Ilustración del ángulo de contacto entre un líquido y una superficie mojanete.

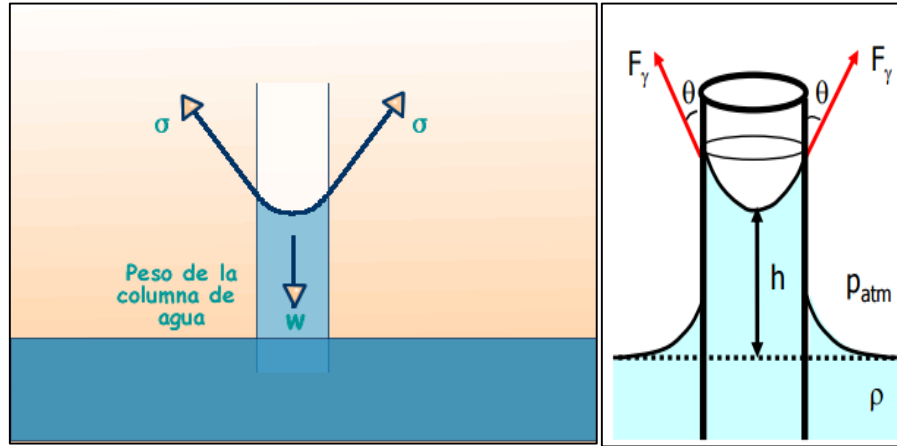


Fuente: (Universidad de Florida, s.f.)

2.1.2. Capilaridad.

Dependiendo del ángulo de contacto, puede ocurrir que el líquido ascienda ($\theta < 90^\circ$) o descienda ($\theta > 90^\circ$) por un tubo estrecho (capilar) una cierta altura h , lo que se denomina capilaridad o acción capilar. En efecto, en el equilibrio, el peso de la columna de líquido se compensará con la componente vertical de las fuerzas de cohesión $F\gamma \cdot \cos\theta$ (debida a la tensión superficial γ). Las fuerzas de adhesión no intervienen (son perpendiculares a la superficie del tubo).

Figura 9. Fenómeno de capilaridad en el agua.



Fuente: (Universidad de Florida, s.f.)

El hecho que las fuerzas adhesivas en el agua sean mayores que las cohesivas, se manifiesta también en la formación de un menisco cóncavo (redondeado hacia abajo) en el extremo de la columna. Cuando las fuerzas cohesivas son mayores que las adhesivas, como en el caso del líquido mercurio, se forma un menisco convexo (redondeado hacia arriba) (Universidad de Florida, s.f.).

3. MEDICIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL

De todas las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas que usualmente se estudian con respecto a las soluciones acuosas, ya sea en el ámbito industrial, biológico o académico, la tensión superficial es una de las de mayor aplicación e importancia, sobre todo en la ingeniería alrededor de la fabricación de una muy extensa variedad de productos químicos, farmacéuticos y alimenticios, entre muchos otros campos de aplicación. Sin embargo, la tensión superficial no es una propiedad tan simple como puede parecer, en especial, en cuanto a la forma experimental de determinarla, empezando porque no es una propiedad presente en toda la extensión de una solución acuosa, como la densidad o la temperatura, sino presente solamente en la región de la solución en contacto con otra fase distinta, sea otra solución distinta o el aire.

Para realizar una descripción acertada del comportamiento de los fluidos en el yacimiento, se deben determinar algunas propiedades con la mayor exactitud posible, como la mojabilidad, la presión capilar, ángulos de contacto y la tensión interfacial. La determinación de estas variables puede representar el 20% del costo del proyecto de recuperación del crudo (Mejia, 2009). Adicionalmente, la medición de la tensión interfacial resulta ser una magnitud fundamental para entender fenómenos como la capilaridad, solubilidad de fluidos inmiscibles, así como para caracterizar los efectos de compuestos surfactantes (Díaz & Becerra, 2008), incluso, este parámetro es un buen indicador de los cambios de composición de una muestra líquida. Si una mezcla líquida se contamina o cambia su composición de modo no deseado, se producirán cambios en su tensión superficial (Tamir & Ruiz, 2009).

3.1. MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL Y/O INTERFACIAL

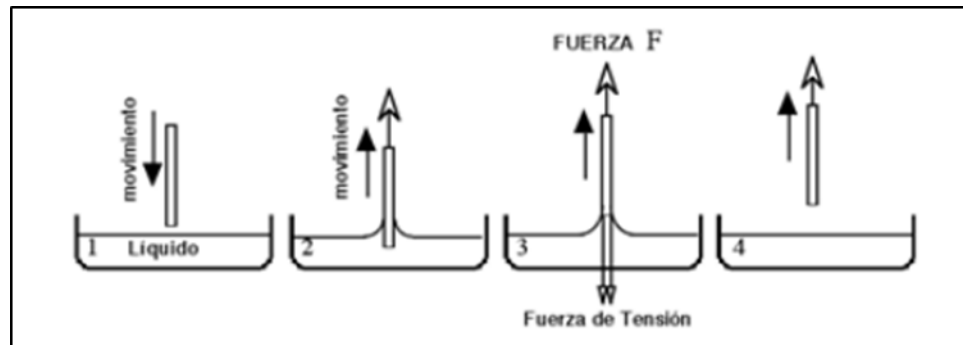
Para la medición de la tensión superficial y/o interfacial se cuenta con dos tipos de métodos: los dinámicos, donde el fluido analizado experimenta algún tipo de movimiento, y estático, donde el fluido en análisis no experimenta movimiento. Para esta investigación se hace hincapié en los métodos de medición de tensión superficial (TS) estáticos, especialmente, el método de la gota colgante, sin embargo, con el fin de tener conocimiento general de cuáles son otros métodos usados, a continuación, se exponen algunos de éstos.

Dentro de los métodos de análisis dinámicos se encuentran:

3.1.1. Método de Wilhelmy-Plate (líquido-líquido y líquido-gas).

En éste método se suspende una placa sobre una balanza, dicha placa se sumerge de manera que las superficie del líquido rodee la placa, se deja en dicha posición y por la fuerza que balancea el peso de la placa y la fuerza ejercida por el menisco se puede determinar la TS (Díaz & Becerra, 2008) como lo muestra la figura a continuación.

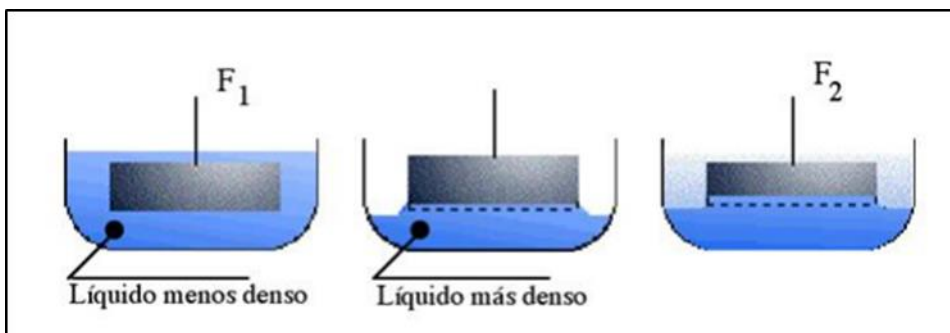
Figura 10. Medición de la tensión superficial de un líquido a través del método de la placa.



Fuente: Jiménez (2012)

Así mismo, para conocer la tensión interfacial entre dos líquidos, se puede sumergir la placa en la interface entre los dos fluidos, realizándose el mismo procedimiento descrito anteriormente.

Figura 11. Medición de la tensión interfacial entre dos líquidos a través del método de la placa.

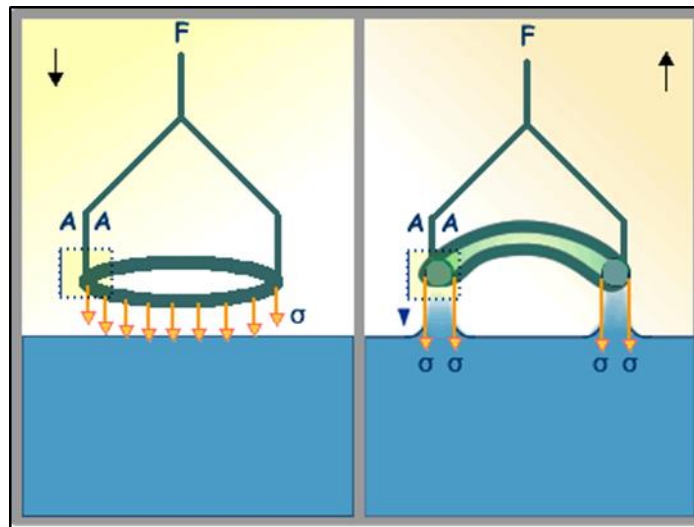


Fuente: (Jimenez, 2012)

3.1.2. Método del anillo de Du Nuoy.

(Líquido-líquido y líquido-gás). En este método se determina la fuerza necesaria para separar un anillo de la superficie, bien suspendido el anillo del brazo de una balanza, o utilizando un sistema de hilo de torsión. La fuerza para despegarlo está relacionada con la TS (Díaz & Becerra, 2008).

Figura 12. Diagrama de cuerpo libre del anillo de DuNoy.



Fuente: (Universidad de Florida, s.f.)

3.1.3. Método del peso de la gota o volumen de la gota (líquido-líquido y líquido-gas).

En este caso, se mide el volumen o peso de las gotas desprendidas de un líquido posicionado de forma vertical desde un capilar. El peso de la gota (o el volumen) se relaciona con la fuerza debida a la TS. El momento de desprendimiento de las gotas ocurre cuando su peso ya no está equilibrado por la TS que se ejerce a lo largo de la periferia exterior del extremo de la pipeta (Díaz & Becerra, 2008).

3.1.4. Método de la presión máxima de la burbuja.

En el que una pequeña burbuja se forma en la extremidad de un tubo pequeño inmerso en el líquido, cuando se le aplica una presión, esto hace que el radio de la burbuja aumente. Cuando la burbuja llega a ser un hemisferio de radio igual al radio del tubo, todo aumento ulterior de la presión provoca la desaparición de la burbuja ya que se dilata y luego se desprende, la presión aplicada, es igual a la diferencia de presión entre los dos lados de la superficie curva, a la cual se agrega la presión hidrostática, función de la profundidad h del orificio del tubo, al conocer dicha presión se puede conocer el valor de la TS (Díaz & Becerra, 2008).

Adicionalmente, como parte de los métodos estáticos se tienen:

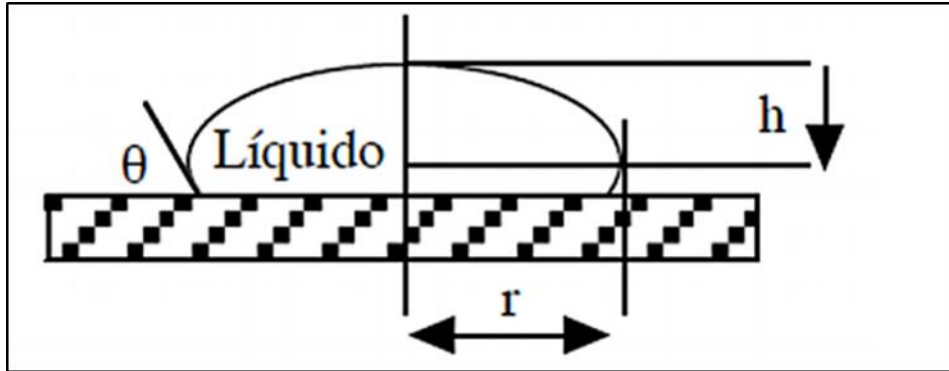
3.1.5. Método de la gota giratoria.

En este método se somete una gota o burbuja de un fluido menos denso colocado en un cilindro de vidrio que tiene el otro fluido, a un movimiento de rotación rápido la fuerza centrífuga induce un alargamiento axial de la gota al cual se oponen las fuerzas capilares. Se usa corrientemente para medir tensión interfacial muy baja líquido-sólido.

3.1.6. Método de la gota sésil o yacente.

El método consiste en colocar una gota pequeña de líquido en una superficie sólida y observar cómo se comporta el líquido al mojar al sólido.

Figura 13. Perfil de una gota sésil.



Fuente: (Gonzalez, 2014)

Si la gota es suficientemente achatada ($r \gg h$), entonces la curvatura en la extremidad superior o inferior, o el polo de la gota, es esencialmente cero, y la distancia h del "polo" al "ecuador" es independiente del diámetro de la gota (Gonzalez, 2014). En tal caso se puede deducir la tensión superficial o interfacial por una relación del tipo:

$$\gamma = \frac{1}{2}(\Delta\rho)(g)(h^2) \quad (1)$$

No obstante, si la gota no está lo suficientemente achatada y r no es significativamente mayor a h , entonces la expresión se convierte en:

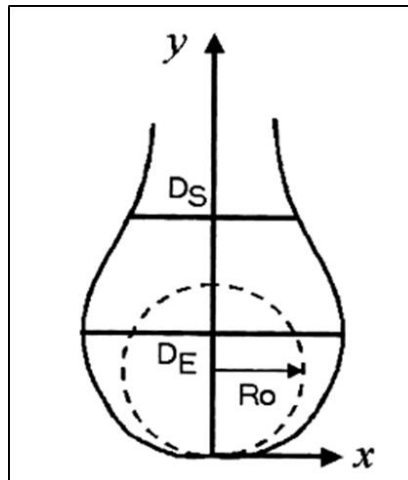
$$\gamma = \frac{1}{2}(\Delta\rho)(g)(h^2) = \left[1 + 0.61 \frac{h}{r} \left(\frac{1 - 4h^2}{r^2}\right)\right] \quad (2)$$

4. MÉTODO DE LA GOTA COLGANTE

Dado que la presente investigación se enfoca en analizar la tensión interfacial del sistema n-alcano/agua a través del método de la gota colgante, a continuación, se hace hincapié esta forma de medición de esta importante propiedad.

Consiste en analizar la forma de una gota suspendida de un tubo capilar o aguja considerando que la gota es simétrica respecto a un eje central vertical (esto es que la gota se puede ver de cualquier ángulo), y la gota se analiza cuando se encuentra estática. El análisis puede efectuarse con una cámara o digitalizando la imagen de la gota, entonces la forma de la gota será proporcional a la TS del líquido que se calcula mediante la fórmula de Laplace-Young. En efecto, el perfil de la gota debe ser analizado teniendo en cuenta tres medidas importantes: El diámetro ecuatorial (D_E), el diámetro de cuello (D_S) y el radio de curvatura del ápice de la gota (R_o)

Figura 14. Observación de los diferentes radios de un perfil de gota colgante en el sistema cartesiano.



Fuente: (Fuentes & López, 2001)

4.1. MODELO MATEMÁTICO: ECUACIÓN DE LAPLACE-YOUNG

Esta ecuación es fundamental para evaluar los fenómenos de capilaridad ocurridos en el método de la gota colgante. En esta expresión: La suma de las curvaturas a un punto de la superficie de una gota de líquido que cuelga de cualquier superficie sólida, es proporcional a la presión hidrostática que existe sobre él. La relación entre la Tensión superficial y la diferencia de presiones en una interfaz curva viene dada por esta ecuación, donde R_1 y R_2 son los dos radios principales de la curvatura de la interfaz y ΔP es la diferencia de presiones en la interfaz.

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

Cuando no se encuentra afectada por ninguna fuerza externa aparte de la gravedad, se puede expresar como una dependencia lineal con respecto a la altura, z , del plano de referencia:

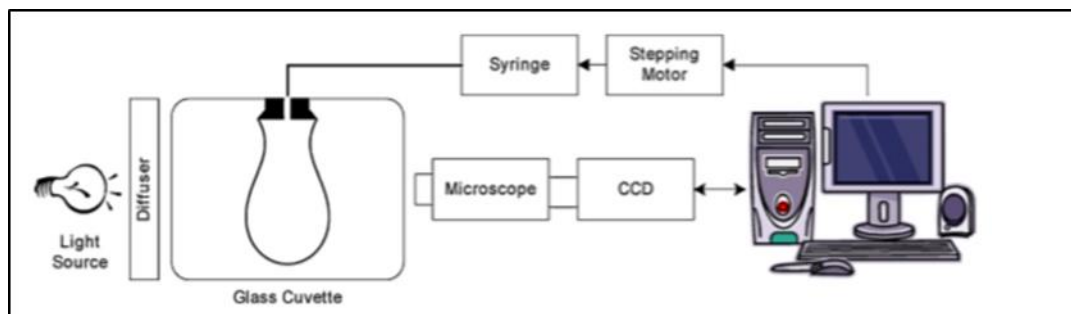
$$\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = (\Delta \rho)(g)(z) + \Delta P_o \quad (4)$$

Donde ΔP_o es la diferencia de presión en un plano de referencia. Así, para un determinado valor de γ , la forma de una gota queda determinada.

Cabe aclarar que una gota colgante bien formada puede considerarse una superficie cilíndrica, esto es que tiene un eje de simetría vertical cuyo volumen puede ser generado por la rotación de una curva en un espacio tridimensional.

4.2. ANÁLISIS DE LA FORMA DE LA GOTA EJE-SIMÉTRICA ADSA

Figura 15. Montaje experimental de un análisis ADSA para el método de la gota suspendida.



Fuente: (Saad, Policova, & Neumann, Design and accuracy of pendant drop methods for surface tension measurement, 2011)

La determinación de la tensión superficial o interfacial mediante el análisis de la forma de la gota eje-simétrica (ADSA) se realiza mediante el análisis de la forma de una gota de un líquido que pende de la punta de una aguja o tubo, o bien que flota cuando la gota del fluido es menos densa que la fase exterior, en este caso se obtiene la gota con una aguja curvada. La imagen de la gota se obtiene con una cámara de vídeo conectada a un ordenador (Universidad Complutense de Madrid, 2012) como lo muestra la figura anterior.

ADSA es una técnica de forma de la gota utilizada ampliamente para la medición de la tensión superficial y ángulo de contacto, este método está basado en la forma de las interfaces líquido / fluido y aunque es complejo, se trata de una forma adaptable no sólo al método de la gota colgante, el cual es usado en esta investigación, sino a una variedad de circunstancias experimentales, incluyendo gotas sésiles, y las burbujas (Saad, Policova, Acosta, & Neumann, 2010). En efecto, la forma de la gota / burbuja depende del equilibrio entre la gravedad y la tensión superficial. El

equilibrio entre la tensión superficial y las fuerzas externas, por ejemplo, la gravedad, se refleja matemáticamente en la ecuación de Laplace-Young de la capilaridad. Cuando los efectos de tensión gravitacionales y de la superficie son comparables, entonces, en principio, se puede determinar la tensión superficial de un análisis de la forma de la gota / burbuja.

4.3. VENTAJAS DEL ANÁLISIS ADSA.

La utilización de este análisis es de gran ayuda en experimentos que requieran de cantidades pequeñas de fluidos, puesto que, verdaderamente no se requieren muestras grandes de los líquidos para realizar la medición de tensión superficial.

Permite además mantener superficies limpias, de modo que se pueden reproducir adecuadamente los resultados. Se evitarán los problemas de adsorción en la región que separa las tres fases, lo que distorsionaría los resultados de tensión superficial o interfacial, principalmente en disoluciones de macromoléculas y proteínas. Este es un método elegante de cálculo de la tensión superficial, que se ha beneficiado de los desarrollos informáticos que permiten la automatización, obtención y procesado de imágenes y cálculos complicados que requerirían de otra forma gran cantidad de tiempo que los harían inviables (Universidad Complutense de Madrid, 2012).

4.4. PARÁMETROS DE AFECTACIÓN DE LA MEDICIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL USANDO EL ANÁLISIS ADSA PARA EL MÉTODO DE LA GOTA COLGANTE

A pesar del éxito general y flexibilidad de ADSA, está bien documentado que, como la forma de la gota / burbuja tiende a convertirse en esférica, el rendimiento de todas las técnicas de forma de la gota, incluyendo ADSA, se deteriora. El mismo problema

también ha sido observado por otros investigadores que están usando optimizaciones numéricas para la medición de tensiones interfaciales (Saad, Policova, Acosta, & Neumann, 2010).

En el método de medición de la gota colgante, método de medición de la tensión superficial, una gota es formada en la punta de una aguja o un soporte circular plano. En este caso, son varios los parámetros que afectan la forma de la gota formada, tales como, tensión superficial (γ), la diferencia de densidades entre el líquido de la gota y el fluido circundante ($\Delta\rho$), la aceleración de la gravedad (g), el volumen de la gota (V) y el radio de la aguja o el soporte (R_h).

En efecto, la forma de la gota es alterada sólo por estos parámetros independientes, por lo que la gota toma una curvatura (b) en el eje axial de la gota, medida como el inverso de su radio R_o , así:

$$b = \frac{1}{R_o} = f(R_h, \gamma, V, \Delta\rho, g) \quad (5)$$

Sin embargo, con el propósito de examinar la curvatura de la gota en términos menos complejos, se procede a especificar, a través de técnicas estándar de análisis dimensional, la curvatura de la gota como una función de parámetros adimensionales. En este caso, Saad, Policova, & Neumann (2011) aclaran que la curvatura adimensional (b_d) de la gota puede ser expresada como función del volumen adimensional (V_d) de la gota y el número de Bond (Bo), definido como la relación entre las fuerzas gravitacionales en la gota y la tensión superficial experimentada. Las ecuaciones de estas variables se expresan a continuación:

$$b_d = \frac{R_h}{R_o} \quad (6)$$

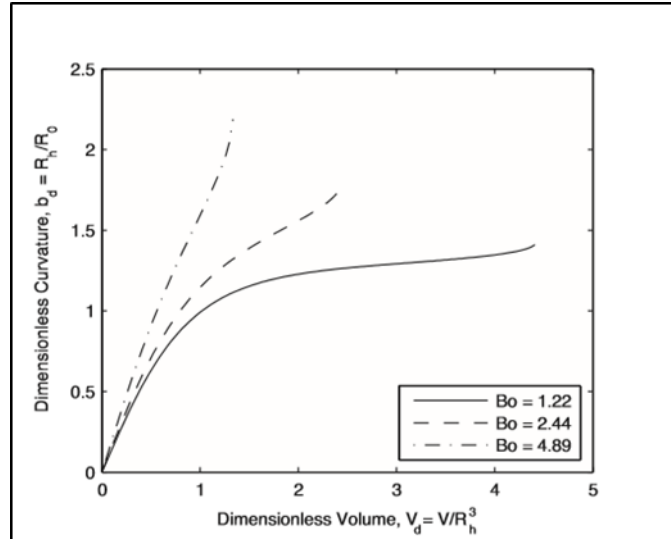
$$Vd = \frac{V}{R_h^3} \quad (7)$$

$$Bo = \frac{R_h^2 \Delta \rho g}{\gamma} \quad (8)$$

$$b_d = f(V_d, Bo) \quad (9)$$

Es importante tener en cuenta que un experimento A puede poseer valores distintos de tensión superficial o radio de soporte de otro experimento B, pero ambos pueden, casualmente, poseer el mismo número de Bond, sin embargo, en este caso, el volumen adimensional de cada experimento será distinto, por lo que, consecuentemente, la forma de la gota también será diferente. Este hecho lo demuestra la siguiente figura, en la que se comparan los tres grupos adimensionales configurados para el análisis de la gota colgante. Se puede apreciar que un cambio en el número de Bond o volumen adimensional, provoca una modificación del valor de la curvatura adimensional de la gota para cada conjunto de datos.

Figura 16. Visualización del cambio de la curvatura adimensional (B_d) de la gota como función del número de Bond y del Volumen adimensional.

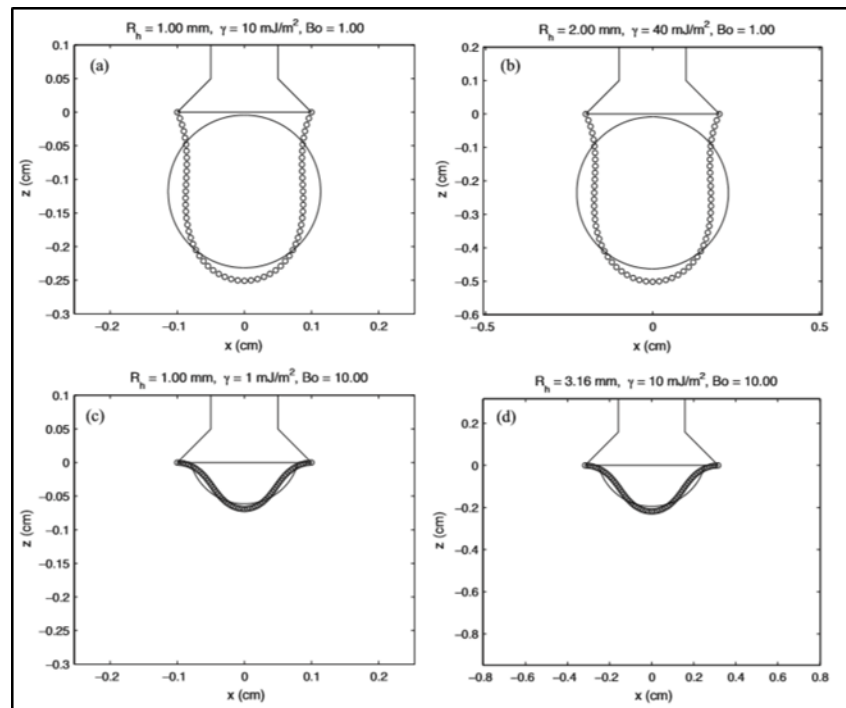


Fuente: Saad, Policova, & Neumann (2011)

De igual forma, si se tuvieran en cuenta cambios en la tensión superficial para dos experimentos A y B donde ambos conservaran el mismo número de Bond y volumen adimensional, entonces, indudablemente, las formas de las gotas experimentales serán iguales. Un ejemplo alusivo lo expone la siguiente figura, en donde el caso **a** muestra un experimento donde la tensión superficial es un cuarto de la tensión superficial del caso **b** y posee una curvatura axial (b) de 13.2 cm^{-1} diferente al caso **b**, cuya curvatura axial (b) es 6.6 cm^{-1} , sin embargo, ambos casos presentan el mismo número de Bond (Bo) y una curvatura adimensional (b_d) correspondiente 1.32, lo que significa un mismo valor de volumen adimensional y por ende una forma de gota colgante equivalente. El mismo experimento lo exponen los casos c y d, los cuales muestran una forma de gota muy similar para valores desiguales de radio de soporte y tensión superficial. En definitiva, se podría decir que el único factor distinto

para cada par de casos correspondientes es el factor de escala producto del tamaño de los soportes.

Figura 17. Comparación entre distintas formas de gota colgante realizando variaciones de radios de soporte, tensión superficial y número de Bond.



Fuente: Saad, Policova, & Neumann (2011)

4.5. PARÁMETRO DE LA FORMA DE LA GOTA.

Este parámetro adimensional se utiliza con el fin de comparar cuantitativamente la diferencia entre la mejor circunferencia posible ajustable al perfil de la gota experimental con la forma de la misma en el laboratorio. La comparación de una forma de gota con un círculo (una proyección de dos dimensiones de una esfera)

es debido al hecho de que la forma de la gota colgante / gotas sésiles o burbujas será esférica en gravedad cero (número de Bond cero). Por supuesto, la sensibilidad de cualquier técnica de la forma de la gota cerca de la gravedad cero es muy limitado y se aproxima a cero. Por lo tanto, la comparación de la forma de una gota / burbuja con la forma gravedad cero es una estrategia adecuada para evaluar la calidad de las técnicas de forma. Así, el enfoque de usar un parámetro de forma, es decir, en comparación con el caso en que la sensibilidad es efectivamente cero, es a menudo preferible al uso de una medida de la sensibilidad local que va a cambiar con el tamaño de la gota constantemente. El enfoque de parámetro de forma también es útil en la predicción de la calidad de la medición, por lo tanto, se puede utilizar para diseñar configuraciones de la tensión superficial. Para ello se utiliza un cálculo algebraico poco complejo, el cual eliminará cualquier dependencia del radio de curvatura del vértice asociado al soporte. En este caso, el círculo puede tener cualquier radio para adaptarse a todos los puntos del perfil. En definitiva, lo que se busca es encontrar el círculo como función de tres variables: a, localización del centro del círculo en el eje x; b, localización del centro del círculo en el eje z y R es el radio del círculo buscado.

La función del círculo que mejor se ajuste a la forma de la gota colgante puede ser expresada como:

$$f(a, b, R) = \sum_{i=1}^n ([(x_i - a)^2 + (z_i - b)^2 - R^2])^2 = \sum_{i=1}^n (e_i + A_{xi} + B_{zi} + C)^2 \quad (10)$$

Donde a es la ubicación del eje x para el centro de la circunferencia, b es la ubicación del eje z para el centro de la circunferencia, R es el radio del círculo. Además:

$$e_i = (x_i^2 - z_i^2); A=-2a; B=-2b \text{ y } C = a^2 + b^2 - R^2. \quad (11)$$

Una vez que se determina el mejor círculo de ajuste, las distancias normales entre cada punto en el perfil de la gota y el mejor círculo de ajuste pueden ser simplemente calculados y utilizados para definir el parámetro de forma como:

$$P = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ([(x_i - a)^2 + (z_i - b)^2 - R^2])^2} \quad (12)$$

Para eliminar el efecto del tamaño de la gota, es deseable definir el parámetro de forma en forma adimensional. Una forma no dimensional se puede calcular mediante la normalización del valor calculado anteriormente con el radio del mejor círculo ajustable al perfil de la gota experimental, esta ecuación es ligeramente distinta al procedimiento para hallar el parámetro de forma de gota en el caso de la gota sésil, donde el radio del círculo es cambiado por el radio del soporte de la gota (R_h).

$$P_c = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ([(x_i - a)^2 + (z_i - b)^2 - R^2])^2} \quad (13)$$

Dado que el parámetro de forma de la gota está en función sólo de la forma de la gota y ésta depende solamente de dos parámetros adimensionales, el número de Bond y el volumen adimensional, entonces, por regla de asociación, el parámetro de forma también depende sólo de estas dos variables adimensionales.

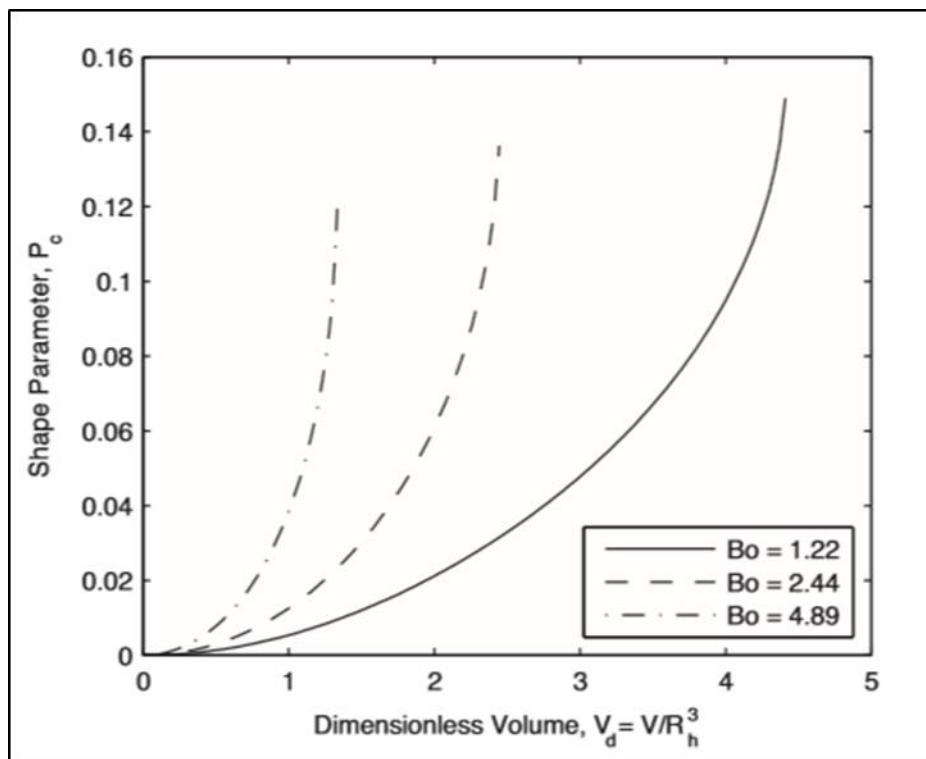
En efecto:

$$b_d = f(V_d, Bo) \quad (14)$$

$$P_c = f(V_d, Bo) \quad (15)$$

Por lo tanto, Saad, Policova, & Neumann (2011) evaluaron el comportamiento del parámetro de forma de la gota colgante en función estas variables. Los resultados se muestran en la figura 18, a continuación.

Figura 18. Comportamiento del parámetro de forma P_c de acuerdo a variaciones del número de Bond y el volumen adimensional.

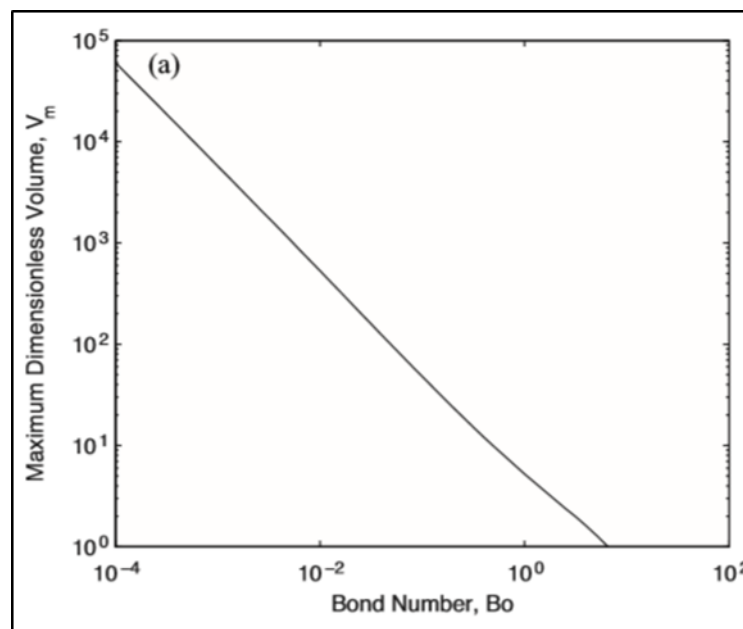


Fuente: Saad, Policova, & Neumann (2011)

De acuerdo con la figura anterior, para un mismo valor de número de Bond y un incremento del volumen adimensional, existe un parámetro de forma mayor,

provocando con ello la generación de gotas mayormente deformadas. De hecho, es claro que incluso para valores más grandes de números de Bond, en la medida en que el volumen adimensional se acerca a cero, el parámetro de forma también lo hace. Esto permite inferir que la medición de la tensión superficial en gotas muy pequeñas no es posible, incluso para valores pequeños de tensión superficial o grandes radios de soporte de gota. En efecto, la observación del volumen máximo adimensional de la gota colgante en función del número de Bond presenta un comportamiento lineal decreciente

Figura 19. Comportamiento lineal decreciente del volumen máximo adimensional de la gota colgante como función del número de Bond.

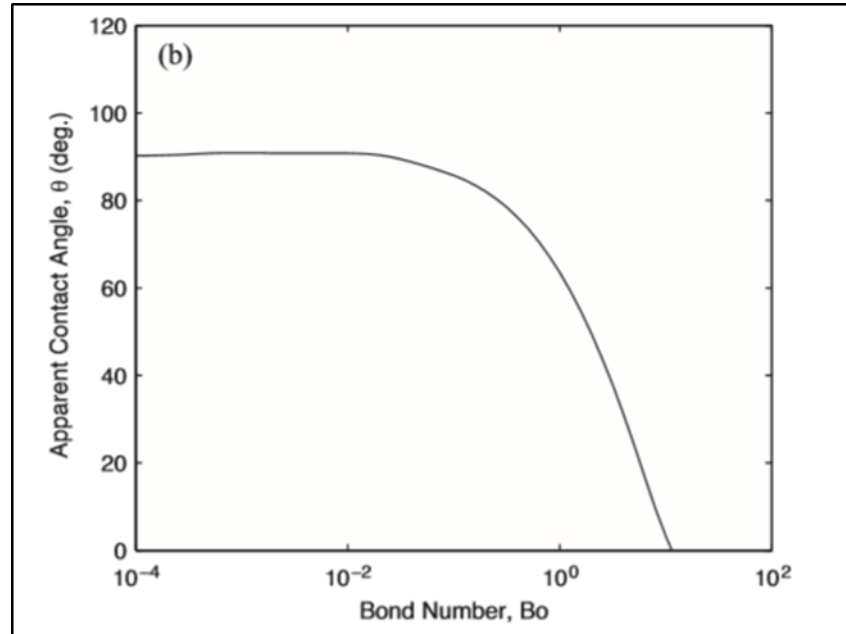


Fuente: (Saad, Policova, & Neumann, 2011)

Adicionalmente, es importante analizar el ángulo de contacto aparente entre la superficie del soporte y la gota colgante. Saad, Policova, & Neumann (2011) encontraron que para valores muy pequeños de número de Bond, el ángulo de contacto rondaba los 90° , sin embargo, en este caso, la gota colgante se mantiene justo por encima de la parte más estrecha del cuello del perfil de la gota, provocando valores de volumen adimensional muy grandes, lo que genera formas de gota muy cerradas y esféricas, como la mostrada en el caso a de la figura 18, este tipo de configuraciones de gota no son apropiadas para hacer mediciones de tensión superficial a través de ADSA. Así mismo, para valores grandes de número de Bond, se alcanza el límite superior, correspondiente a 10.338, en este escenario, los valores de ángulo de contacto aparente alcanzan los 0° , por lo tanto las gotas también se hacen muy esféricas y cerradas, impidiendo de esta manera cualquier trabajo de análisis ADSA. Es importante aclarar que para valores más grandes del límite superior del número de Bond, se alcanzan formas de gota inestables y con orificios que no permiten la humectación de toda la superficie del soporte, por lo tanto nunca es recomendable sobrepasar este valor de Bo.

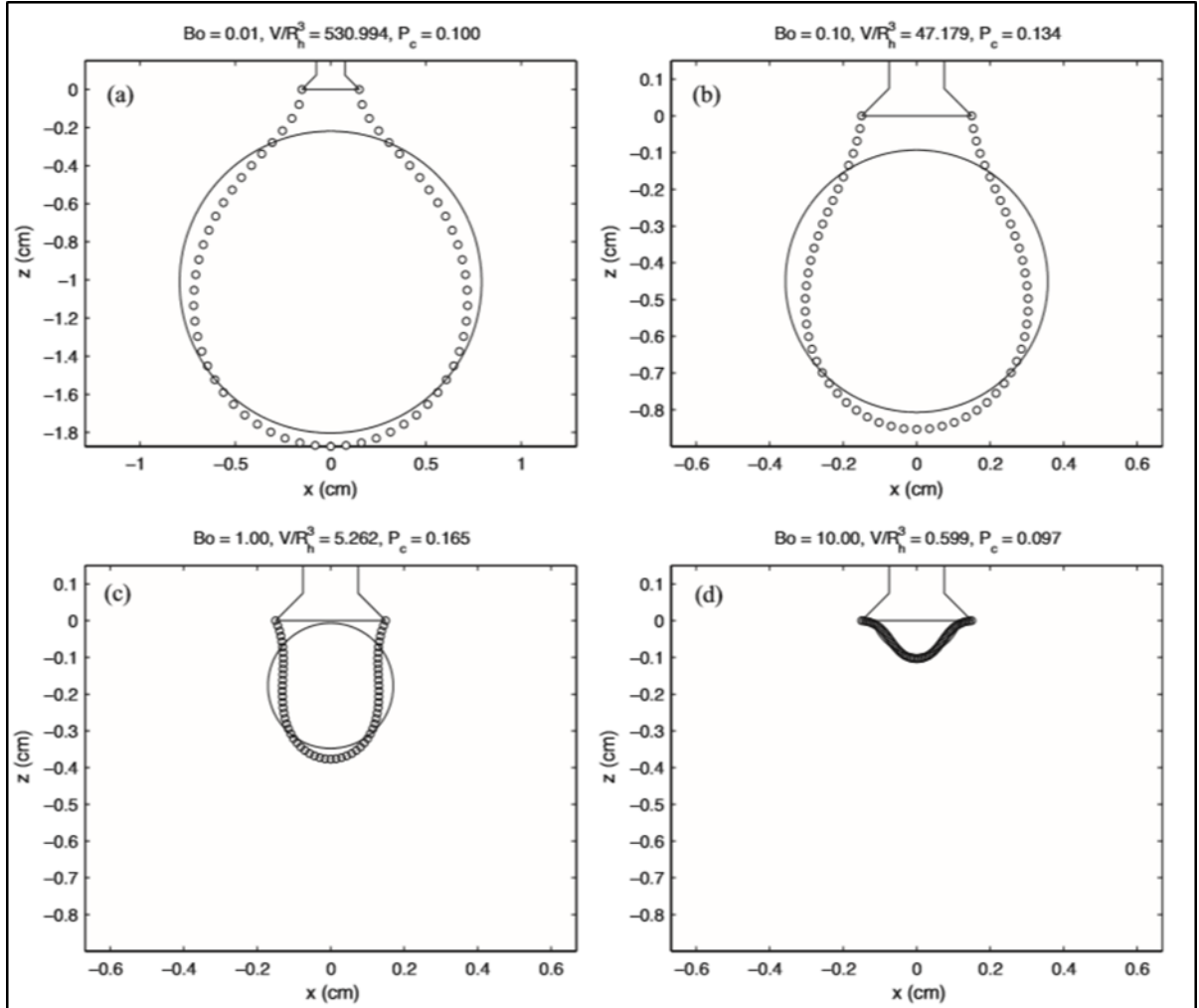
De acuerdo con la figura 20, los valores máximos de volumen adimensional para números de Bond iguales a 0.01; 0.1; 1.0 y 10.0 demuestran que el ángulo de contacto varía considerablemente, restringiendo las mediciones de tensión superficial en los casos donde la gota adquiere formas muy esféricas y cerradas como los casos a y d.

Figura 20. Comportamiento del ángulo Aparente de contacto en función del número de Bond.



Fuente: (Saad, Policova, & Neumann, 2011)

Figura 21. Visualización de formas de gotas colgantes de acuerdo a variaciones de número de Bond, Volumen adimensional y parámetro de forma.

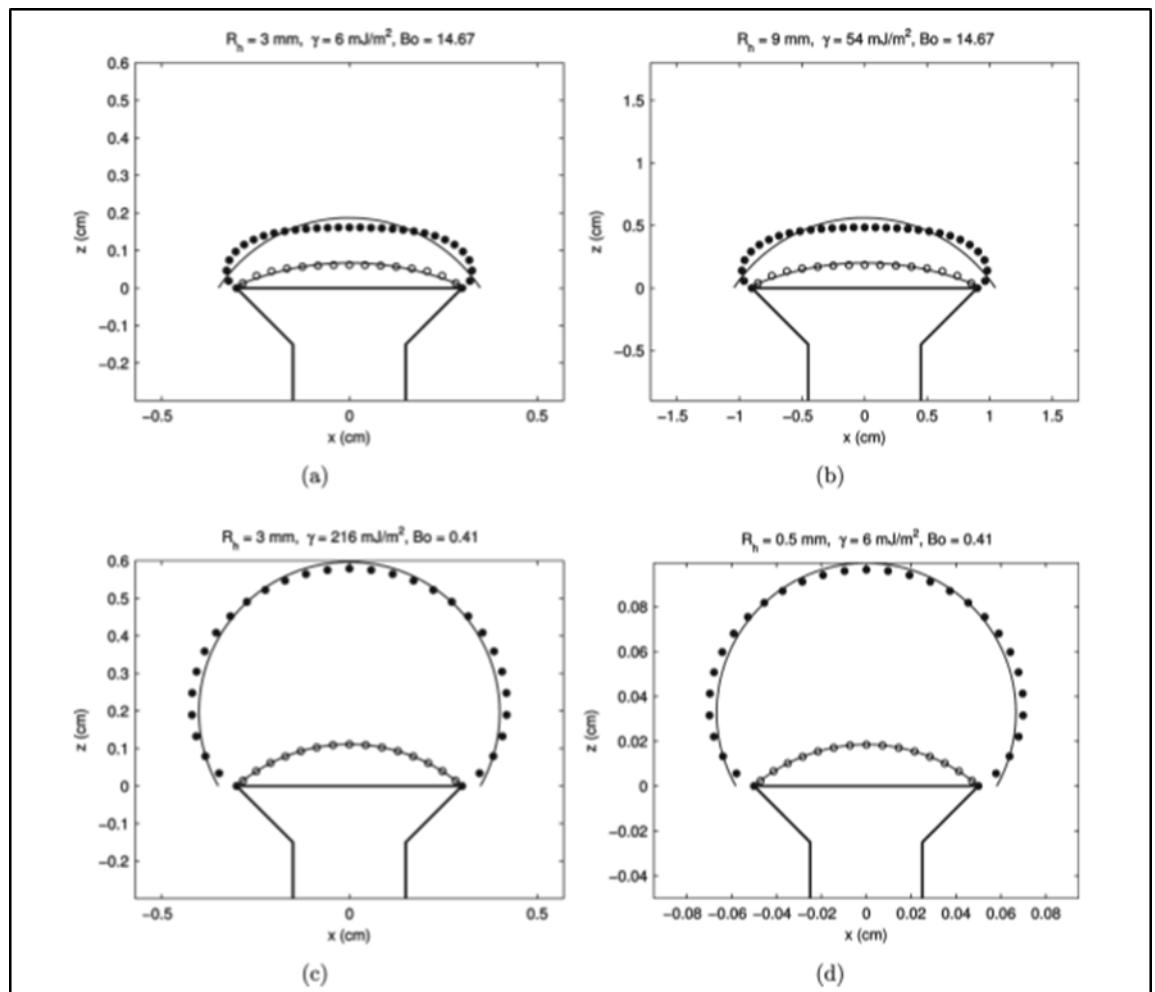


Fuente: (Saad, Policova, & Neumann, 2011)

Es importante tener en cuenta que los parámetros de dependencia de la forma de la gota no son solamente característicos del método de la gota suspendida, puesto que para el método de la gota yacente o sésil, también se cumplen las mismas consideraciones dado que está basado en las mismas variables, de esta forma, la figura siguiente muestra que los distintos perfiles de gota yacente sólo se modifican

al variar el número de Bond y el volumen adimensional de la gota, los cuales se hallan teniendo en cuenta las mismas ecuaciones matemáticas del método de la gota suspendida.

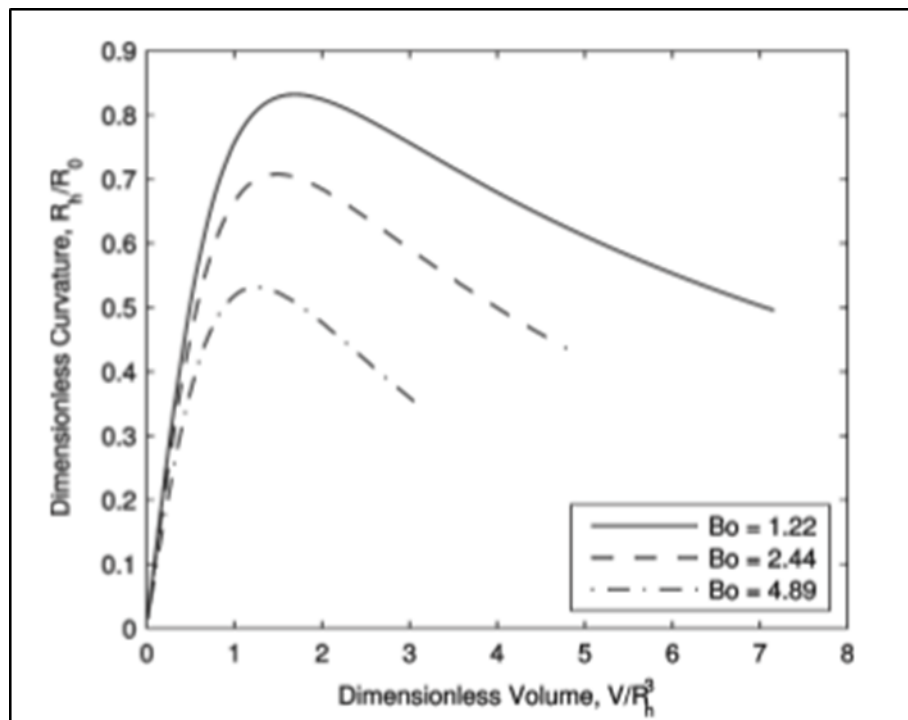
Figura 22. Observación de perfiles de gota de acuerdo a cambios en el número de Bond en el método de la gota sésil.



Fuente: (Saad, Policova, Acosta, & Neumann, 2010)

Del mismo modo, las investigaciones de Saad, Policova, Acosta, & Neumann (2010) dejan claro que el comportamiento de la curvatura adimensional de la gota sésil es equivalente al comportamiento observado en la gota suspendida, donde la curvatura adimensional es, claramente, una función del volumen adimensional y el número de Bond, alcanzándose valores de curvatura muy bajos para volúmenes adimensionales muy pequeños, los cuales se caracterizan por ser perfiles de gota muy cerrados y circulares, incapaces de ser medidos a través del ADSA.

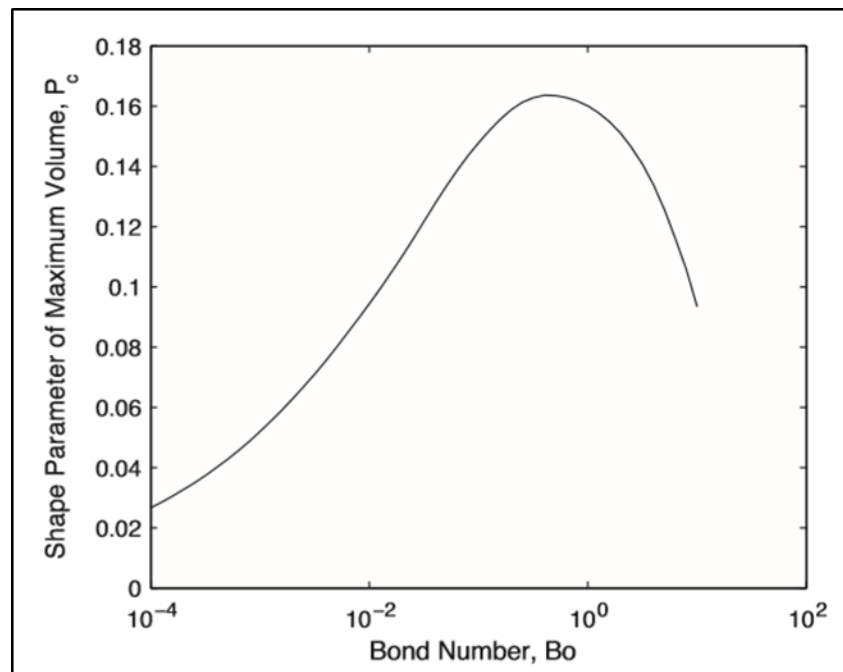
Figura 23. Relación entre el número de Bond, el volumen adimensional y la curvatura adimensional para el método de la gota sésil.



Fuente: (Saad, Policova, Acosta, & Neumann, 2010)

Si bien, las formas de gota colgante alcanzadas demuestran la importancia del conocimiento del número de Bond, también es relevante observar la relación existente entre este valor adimensional y el parámetro de forma. De esta manera, la investigación de Saad, Policova, & Neumann (2011), demuestran que para valores pequeños de Bo , se registran valores de parámetro de forma también pequeños, este comportamiento es creciente hasta alcanzar un valor de Bo igual a 1.0 donde se presenta un decaimiento de los valores máximos de parámetro de forma, hasta alcanzar el límite inferior de Bo , donde se dijo anteriormente, es imposible realizar medidas de tensión superficial con análisis ADSA.

Figura 24. Valores de parámetros de forma máximos en función del número de Bond.



Fuente: (Saad, Policova, & Neumann, 2011)

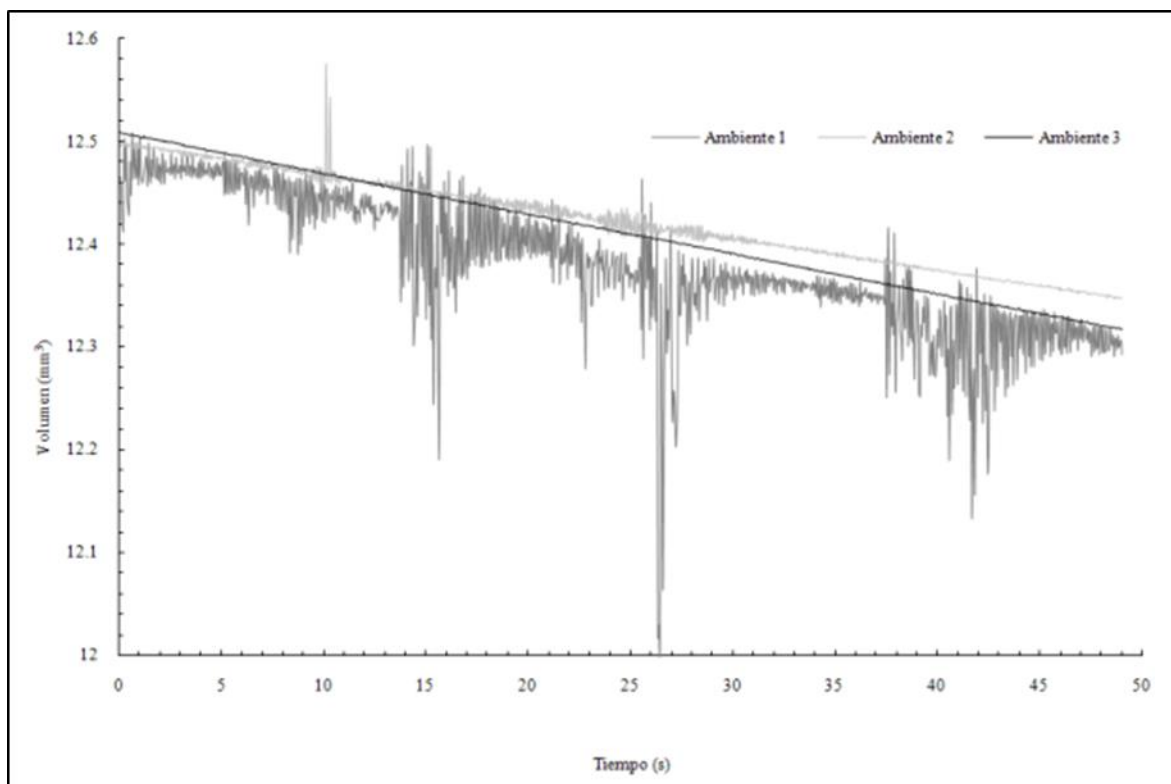
4.6. LA VIBRACIÓN COMO PARÁMETRO DE AFECTACIÓN DEL MÉTODO ADSA

Durante el proceso de medida ADSA la gota va perdiendo masa por evaporación, su frecuencia propia de resonancia varia y si en el ambiente encuentra excitaciones vibratorias monocromáticas se producirá vibraciones que afectan tanto a la exactitud como a la precisión.

De hecho, las vibraciones afectan tanto a la exactitud como a la precisión de la medida de la tensión superficial en el método de la gota suspendida con análisis ADSA, principalmente por la inducción resonante de los modos de vibración de la gota. Una disminución drástica de las vibraciones en general reduce solamente algo la dispersión cuadrática media si se mantienen excitaciones de resonancia. Sin embargo, la reducción de los niveles de vibración monocromáticos reduce finalmente en gran manera la dispersión cuadrática media (Álvarez, Díaz, & Pérez, 2010).

En la figura a continuación se exponen los resultados de la investigación llevada a cabo por Álvarez, Díaz, & Pérez (2010), en la que se detallan los cambios pronunciados en los volúmenes de gota suspendida en función del tiempo, para tres ambientes experimentales distintos. El ambiente 1 presenta la mayor incidencia de vibraciones externas (aparatos electricomagnéticos del laboratorio, movimiento sísmico del terreno y ruido externo), mientras que los ambientes 2 y 3 fueron aislados mediante una bancada amortiguadora de una sola etapa y dos etapas, respectivamente, consistentes en una placa o dos de aluminio de 2.0 mm de espesor de 400x200 mm soportada mediante cuatro amortiguadores.

Figura 25. Volumen de gota en función del tiempo de permanencia en tres ambientes vibro-acústicos distintos.



Fuente: (Álvarez, Díaz, & Pérez, 2010)

Los resultados de la experiencia demostraron que las perturbaciones vibro-acústicas inciden en la medición de la tensión superficial a través del método ADSA, por lo que es importante mantener espacios de experimentación libres de ruido, incidencias electromagnéticas y vibraciones de terreno.

5. MÉTODOS EXPERIMENTALES

5.1. MATERIALES Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Según la consulta bibliográfica hecha, los objetivos planteados y las recomendaciones de las partes interesadas en el proyecto, se diseñó una configuración consistente en el análisis de dos hidrocarburos (Heptano y Decano) en contacto con agua en condiciones isobáricas y un incremento gradual de temperatura.

La decisión de mantener la presión atmosférica constante responde a que en experimentos anteriores el aumento de este valor no afectaba significativamente los resultados, a su vez por que varios experimentos de gota emergente o gota colgante como suelen llamarle algunos autores fueron llevados a cabo a presión atmosférica (Zeppieri S, et al. 2011) y debido a que en modelamientos computacionales de la tensión interfacial entre hidrocarburos y agua los resultados obtenidos permitieron despreciar la presión de confinamiento (Mejía M. 2009).

De igual manera se llevará a cabo una prueba de los hidrocarburos en presencia de agua contaminada con NaCl, para verificar el comportamiento de la tensión interfacial en este sistema, el resumen de las condiciones de las pruebas, así como su repetitividad es mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. *Diseño experimental.*

T	P	Número de mediciones		
		C ₁₀ H ₂₂ + H ₂ O	C ₇ H ₁₆ + H ₂ O	(C ₁₀ H ₂₂ + 3%NaCl) + H ₂ O
26	Atm	10	10	10
40	Atm	10	10	10
60	Atm	10	10	10
80	Atm	10	10	10

Por otra parte, es importante enfatizar en las características generales de los fluidos destinados a los ensayos por tal motivo la figura 26 ilustra los elementos utilizados en el laboratorio, cabe destacar que los últimos dos ítems son usados para la limpieza habitual del equipo.

Figura 26. Implementos utilizados L-RAP/UFRJ.



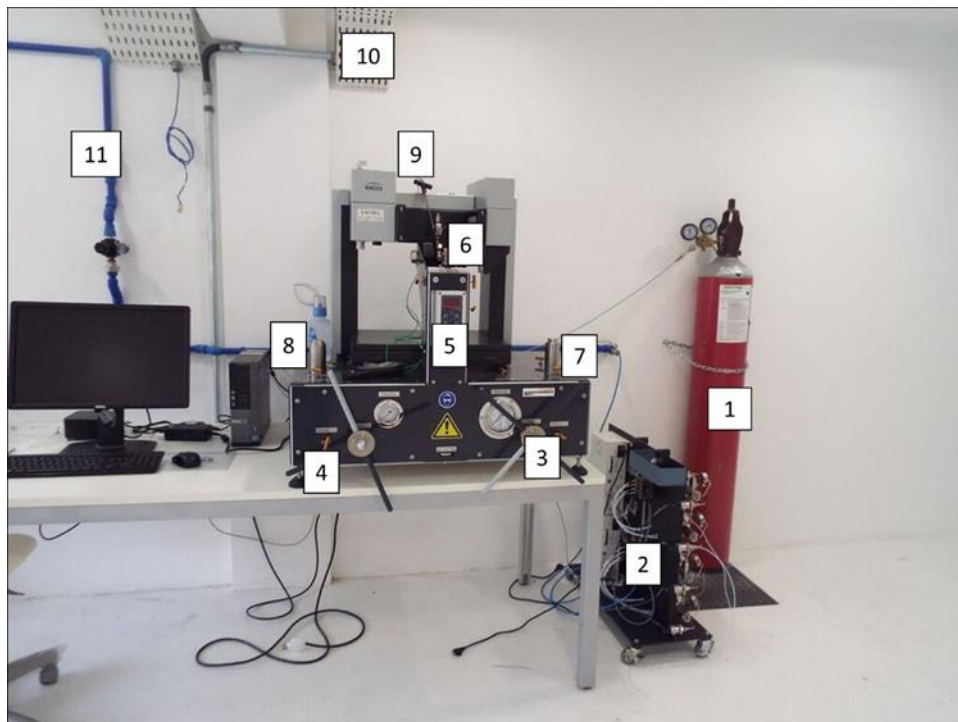
1. **Salmuera** (Agua con tres por ciento de cloruro de sodio disuelto NaCl)
2. **Heptano 99+%, Vetec**
3. **Decano 99+%, Vetec**
4. **Solvente común.**

5. **Agua destilada.** Fue utilizada en los procedimientos experimentales y para intentar eliminar las impurezas.

5.2. EQUIPO Y PROCEDIMIENTO

Los ensayos fueron llevados a cabo en el equipo *-Drop Shape Analyzer DSA100HP-* de la empresa alemana *Kruss*, perteneciente al laboratorio de recuperación avanzada del petróleo L-RAP de la Universidad Federal de rio de Janeiro el cual permite calcular la tensión interfacial de líquidos utilizando el método de la gota pendiente o la gota colgante.

Figura 27. Equipo usado para la medición de tensión interfacial y ángulo de contacto. 1. Cilindro de Nitrógeno. 2. Celdas de descarga. 3. Celda de presión fluido. 4. Celda de presión fluido. 5. Medidor y calibrador de temperatura. 6. Unidad de observación microscópica. 7. Celda de confinamiento fluido. 8. Celda de confinamiento fluido. 9. Tubo capilar. 10. Tubería de escape. 11. Tubería alimentadora de la célula.

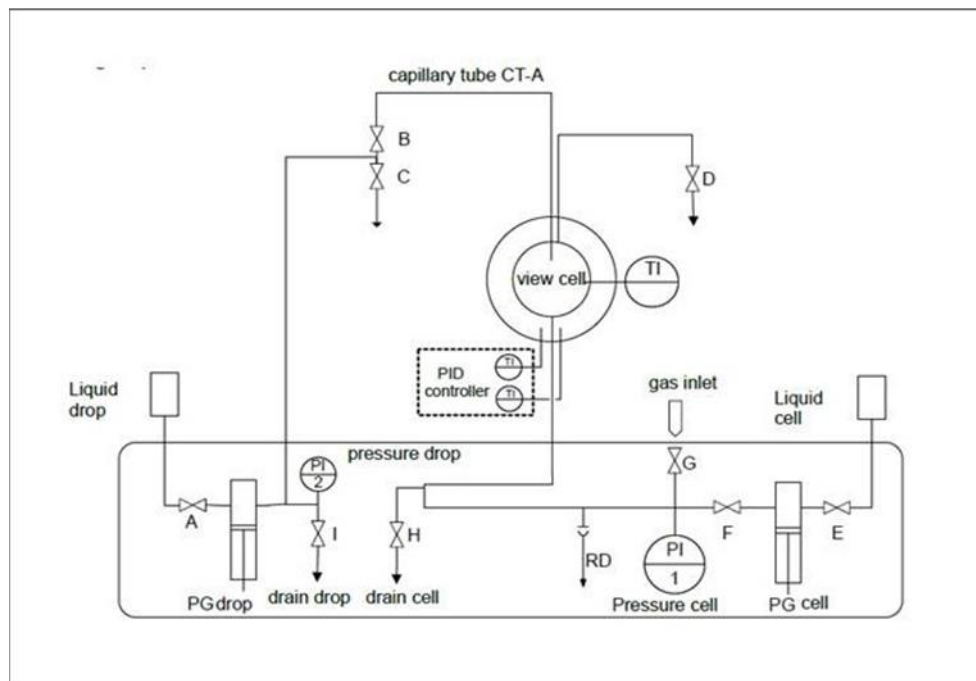


Como se muestra en la figura 27 consiste en dos depósitos manuales de acero inoxidable con capacidad de sesenta (60) mililitros a su vez fue diseñada para soportar seiscientos noventa (690) bars de presión.

Estas celdas fueron probadas en una serie de experimentos en donde contrastando con otros autores se obtuvieron óptimos resultados, de hecho, uno de los objetivos de este trabajo fue evidenciar el correcto funcionamiento del instrumento recién adquirido por la compañía británica *British Gasal* servicio de la COPPE/UFRJ.

Para el caso de la medición de la tensión interfacial el equipo posee un rango que va desde 0.01 hasta 2000 (mN/m), resolución de 0.01 (mN/m), exactitud de 0,3 (mN/m), igualmente permite calcular la IFT en estado estático y/o dinámico y utiliza a Young-Laplace como ecuación de corrección para arrojar resultados.

Figura 28. Esquema Drop Shape Analyzer.



Fuente: Universidad Federal de Rio de Janeiro

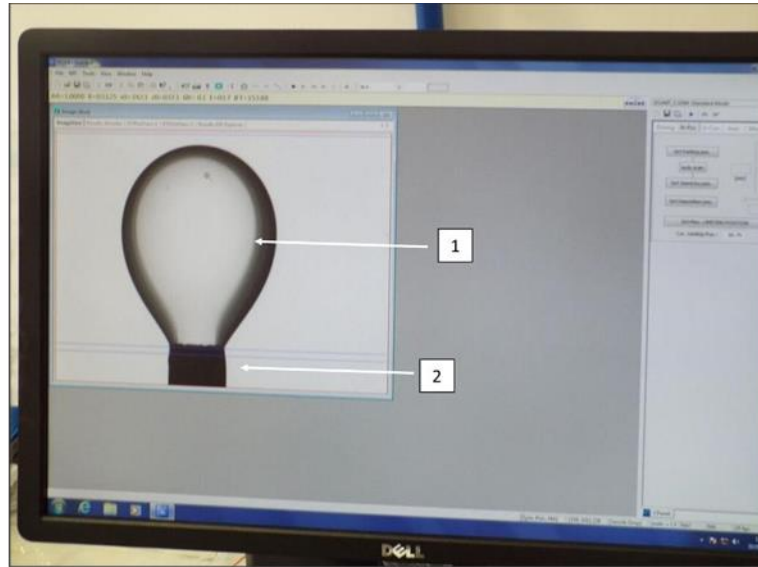
Inicialmente se llena cada una de las celdas (*Liquid drop* y *Liquid Cell*) con los fluidos componentes de cada sistema, acto seguido se procede a dar paso mediante las válvulas A y E al punto en el cual los líquidos serán inyectados mediante acción manual de pistones (*PG drop* y *PG cell*).

El fluido transferido desde la celda (*Liquid Drop*, generalmente el n-alcano) hará su recorrido a través del tubo capilar (*Capillary Tube CT – A*), teniendo en cuenta que la válvula B deberá estar abierta y la válvula C cerrada; Por último, terminará en la boquilla que dará el contorneado de la gota la cual también cuenta con una celda de visualización (*View Cell*).

Por otra parte, el agua seguirá el camino descrito en la figura 28, en donde cabe resaltar que la válvula F deberá estar abierta y la válvula G deberá estar cerrada, así el fluido entrará mediante un conector anverso al usado para la inyección del n-alcano.

Una vez los dos fluidos se encuentren en la celda de visualización (La cual contiene una cámara de alta resolución), se procede a la elaboración de gotas homogéneas las cuales son supervisadas, calibradas y calculadas mediante el *sowftware Kruss*, de esta manera se cuantifica un IFT Provisional que debe ser corregido teniendo en cuenta las densidades de los fluidos a determinadas temperaturas.

Figura 29. Imágenes del software Kruss, Zona de contacto calculada IFT 2. Boquilla DSA.



6. ANÁLISIS DE DATOS

6.1. TRATAMIENTO DE DATOS

6.1.1. Sistemas (n-decano + agua) y (n-heptano + agua)

El DSA proporciona un valor numérico como resultado de la medición de la tensión interfacial, el cual debe ser corregido mediante un cálculo matemático, para el procedimiento antes mencionado es indispensable conocer la densidad de cada uno de los componentes del sistema a la temperatura requerida, en este caso la figura 30 y la figura 31, ilustran justamente la variación proporcional de las propiedades objetivo (T y d) del agua y un n-alcano respectivamente, además el equipo también suministra atributos importantes como el factor de esfericidad (B) y volumen de gota (V).

Figura 30. Variación de la densidad del agua con respecto a la temperatura.

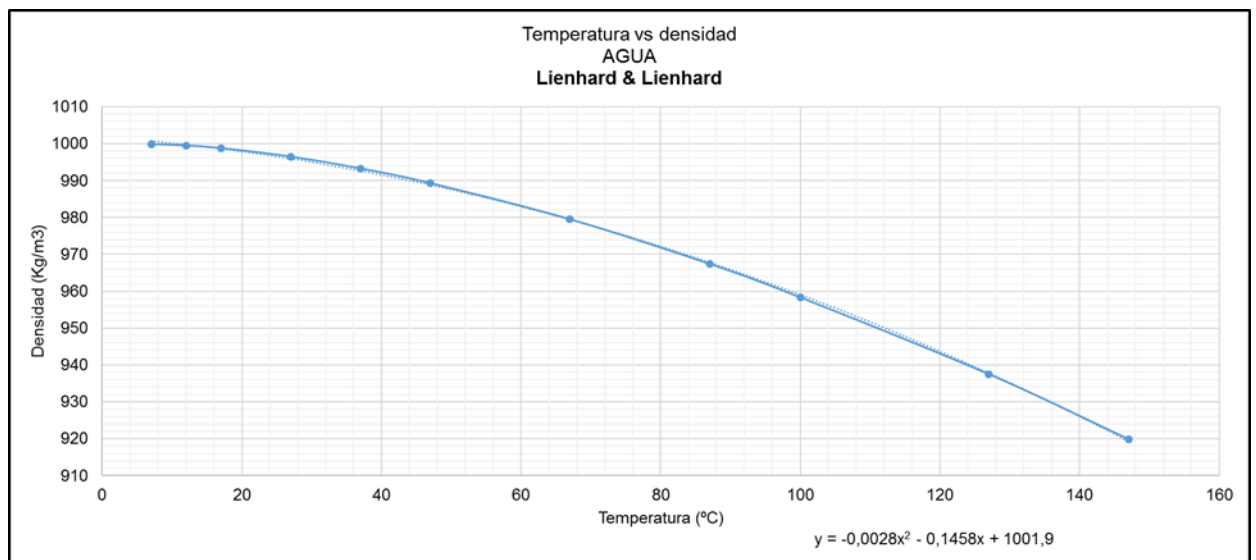
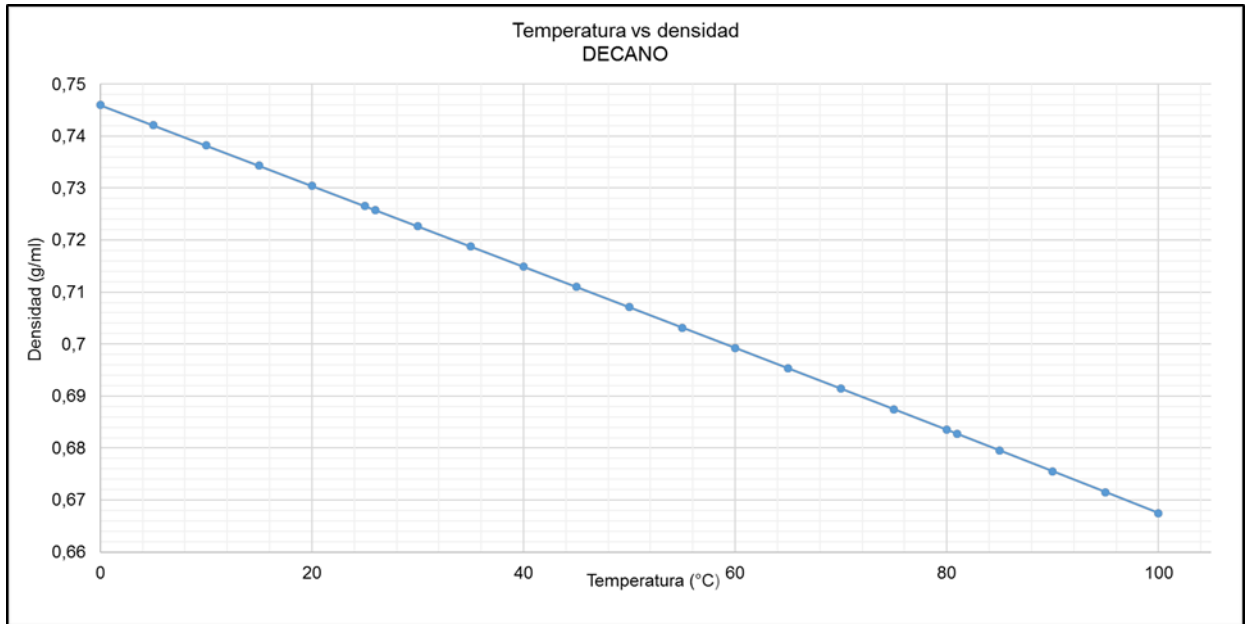


Figura 31. Variación de la densidad de un n-alcano con respecto a la temperatura.



Por lo tanto, el valor de la tensión interfacial corregida es:

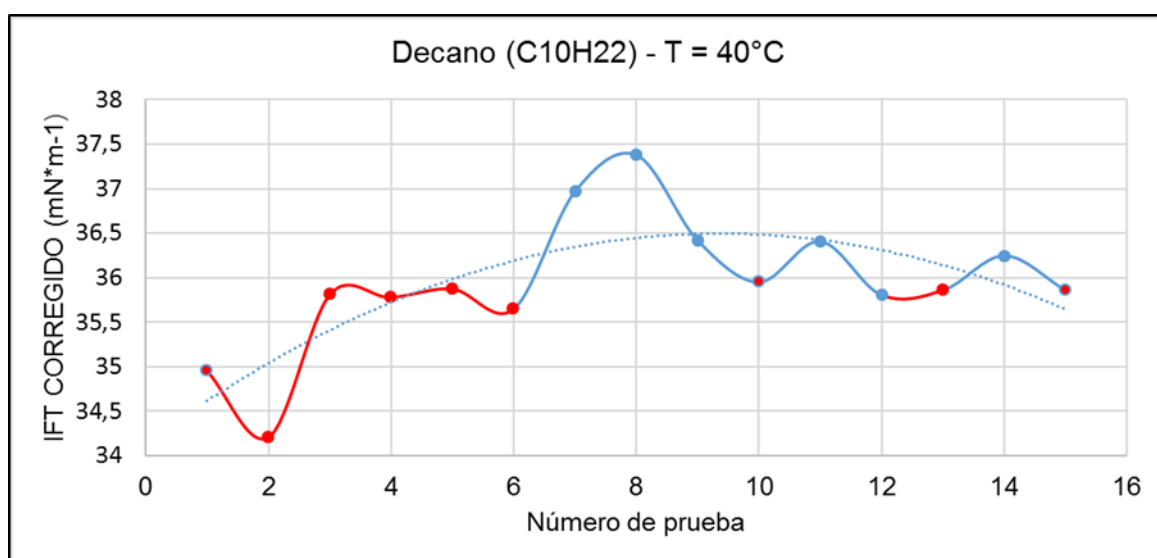
$$IFT_{Real} = (Densidad_{H_2O} - Densidad_{Alcano}) * IFT_{medio} \quad (16)$$

Una vez efectuada la corrección, se procede a analizar estadísticamente el conjunto de datos, eliminando de esta manera todos los valores que estén cuatro puntos porcentuales retirados de la media, tal y como es expuesto en la siguiente tabla 2 y figura 32.

Tabla 2. Análisis estadístico de datos.

n	10	Número de Datos
Media	40,619	Media Aritmética
σ	1,848462104	Desviación Estándar
Min	35,556	Valor mínimo de los datos
Mediana	41,085	Mediana o Cuartil 2
Máx	41,761	Valor máximo de los datos

Figura 32. Eliminación de los valores retirados cuatro puntos porcentuales de la media.

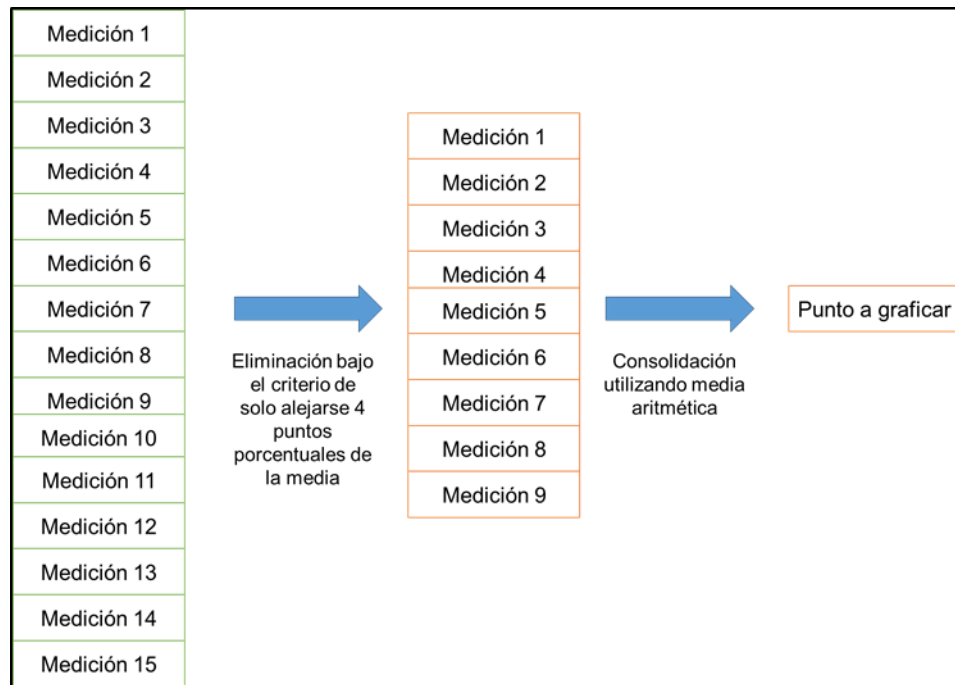


Posteriormente, los datos resultantes de la eliminación son consolidados y se realiza de nuevo el análisis estadístico con la misma consideración de apartar los puntos alejados nuevamente.

Los resultados tamizados son consolidados a través de la función estadística simple de media aritmética y serán representados a través de un punto referenciado en el plano cartesiano, la curva diseñada por los valores obtenidos para cada temperatura

será el comportamiento de la tensión interfacial para el sistema estudiado, la figura 33 esquematiza el flujo de trabajo en el análisis de resultados.

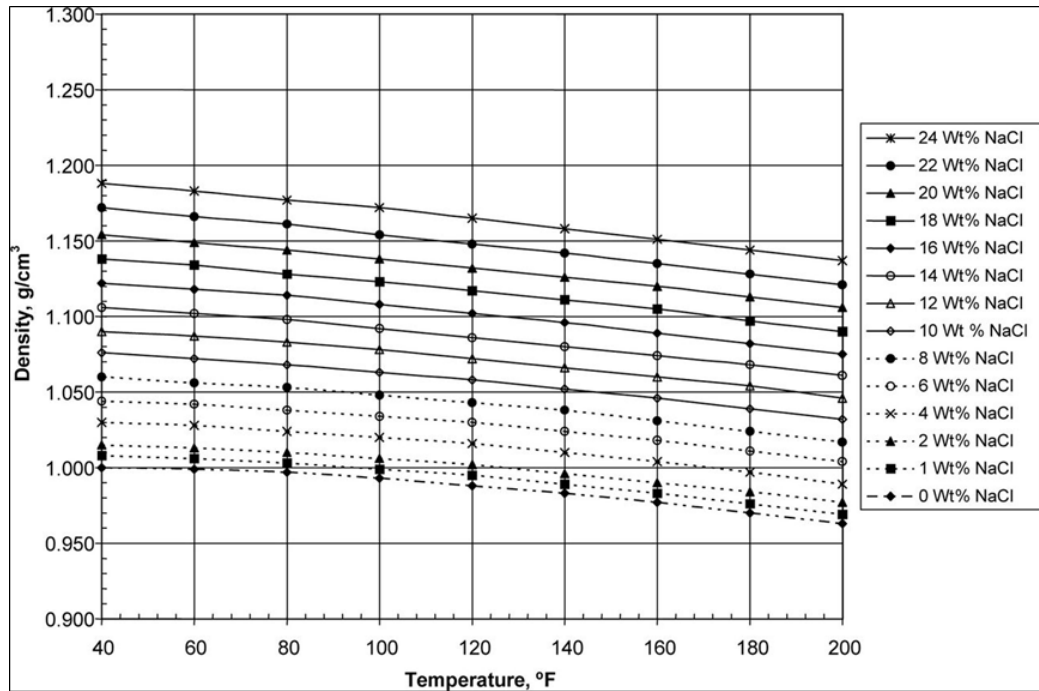
Figura 33. Flujo de trabajo en el tratamiento de datos.



6.1.2. Sistema (decano + (agua + 3%NaCl))

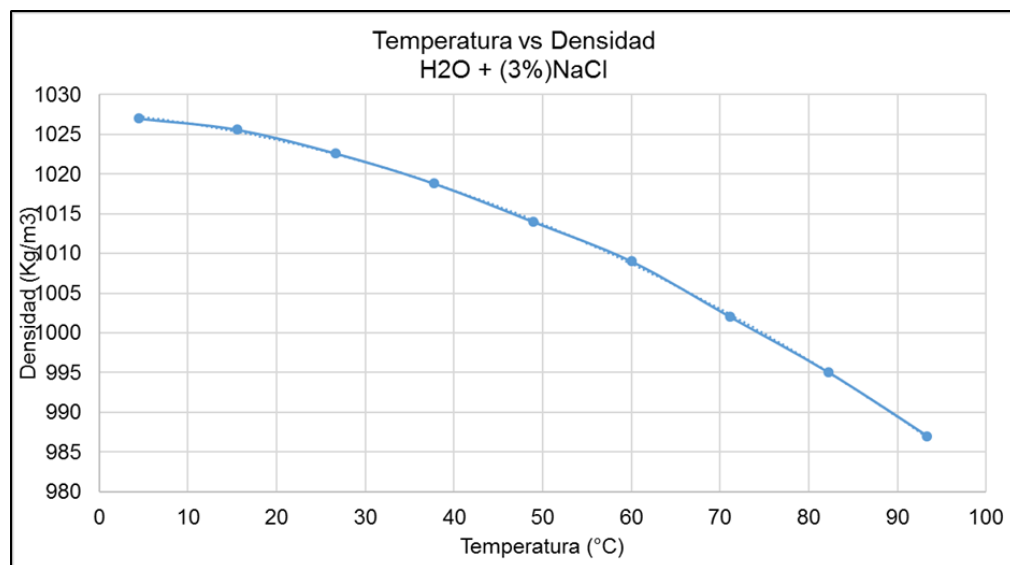
El procedimiento es similar al del tratamiento de un sistema que no está contaminado por sal, su única diferencia radica en que la curva de densidad con respecto al tiempo varía según el porcentaje de salmuera presente en el sistema, tal y como es evidenciado en la figura 34, de igual manera la figura 35 muestra con más detalle la concentración de salmuera en el sistema de interés.

Figura 34. Variación de la densidad con respecto al tiempo con relación a la concentración de salmuera disuelta en Agua.



Fuente: Schlumberger

Figura 35. Variación de la densidad con respecto al tiempo con relación a tres por ciento de salmuera disuelta en Agua.



6.2. ANÁLISIS DE PROPAGACIÓN DEL ERROR.

Una vez seguida la metodología anteriormente propuesta (ANEXO A) es indispensable conocer el número de dígitos significativos que deben ser considerados, esto con el fin de evitar el fenómeno de propagación del error, para esta finalidad fue utilizado el método gráfico debido a que es especialmente diseñado para estimar los parámetros de desviación de las rectas o de funciones que puedan ser expresadas como tales; Es un método que tiene mayor porcentaje de éxito si las escalas de los gráficos a analizar permiten mostrar claramente las discordancias derivadas del uso de varias cifras. (Brito Cruz, UNICAMP, 1997).

Figura 36. Análisis de propagación del error para el sistema n-decano/agua.

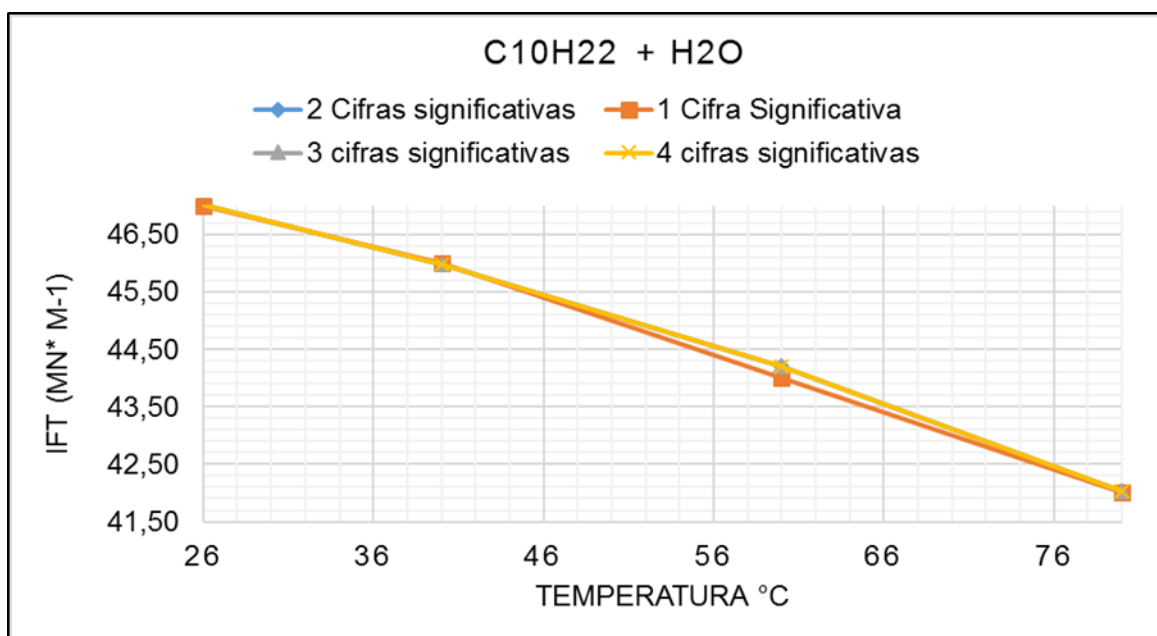


Figura 37. Análisis de propagación del error para el sistema n-decano/agua contaminada.

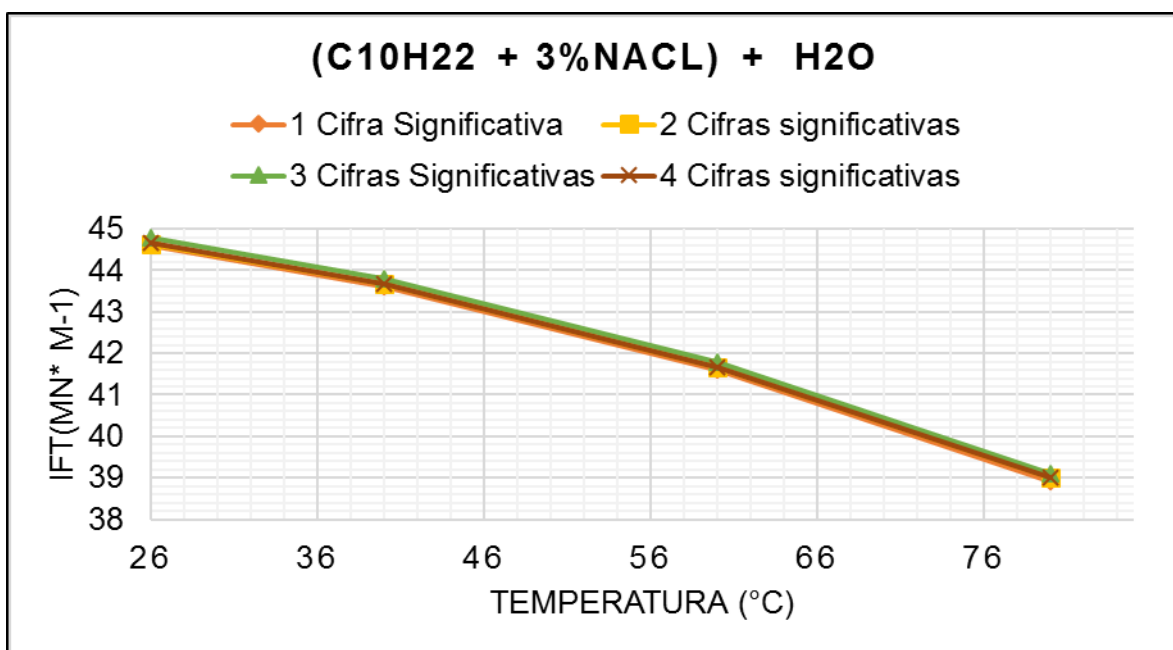
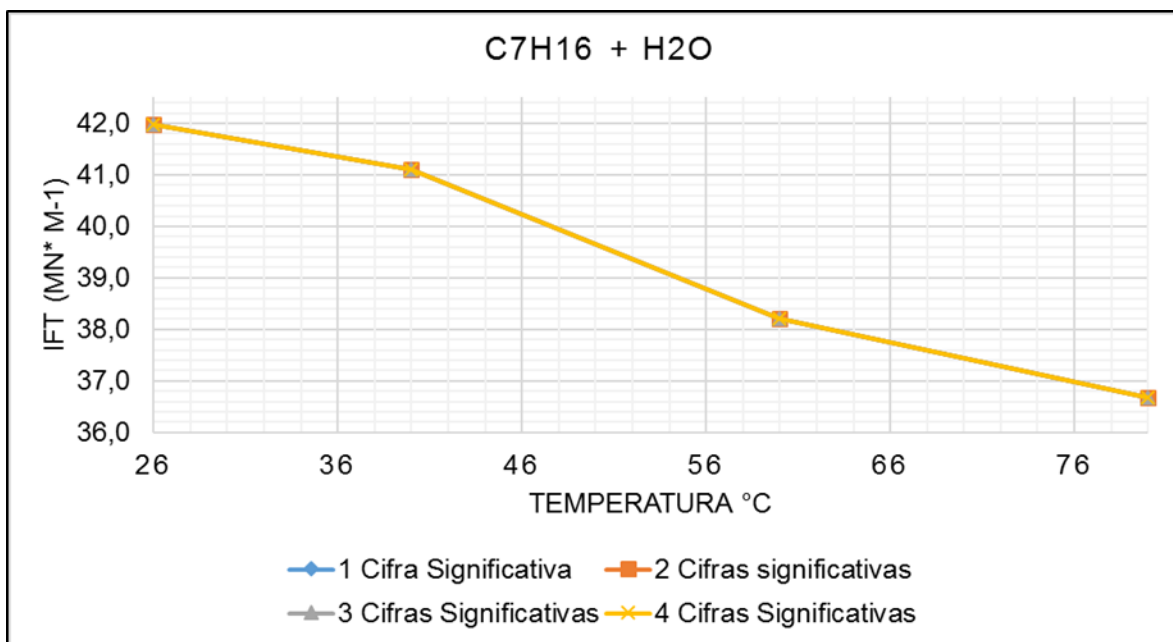


Figura 38. Análisis de propagación del error para el sistema n-heptano/agua.



De acuerdo a lo mostrado en la figura 37, es perceptible que la función diseñada con tres y cuatro números decimales tiene una discrepancia importante con la trazada con uno y dos decimales, a estos elementos puede añadirse que en la figura 36 al momento de tener en cuenta únicamente un decimal se corre el riesgo de perder objetividad por el hecho de redondear a la cifra más cercana, lo cual implica una seria desviación de los datos obtenidos, por lo tanto de acuerdo a las figuras 35, 36, 37, el equipo de trabajo toma la decisión de trabajar con dos números decimales como cifras significativas.

6.3. OBSERVACIONES, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 3 y en la figura 39 son presentados los valores de la tensión interfacial de cada uno de los sistemas evaluados para la respectiva temperatura, de igual forma se muestran las consideraciones interesantes en el desarrollo de las pruebas y el análisis del producto final:

Tabla 3. Valores de IFT VS TEMPERATURA para cada Sistema.

T (°C)	Tensión Interfacial $\gamma/mN^* m^{-1}$		
	C ₁₀ H ₂₂ + H ₂ O	(C ₁₀ H ₂₂ + 3%NaCl) + H ₂ O	C ₇ H ₁₆ + H ₂ O
26	47,02	41,18	44,65
40	45,99	40,38	43,69
60	44,19	38,30	41,67
80	42,02	36,01	39,00

Figura 39. Valores de la tensión interfacial a diferentes temperaturas.

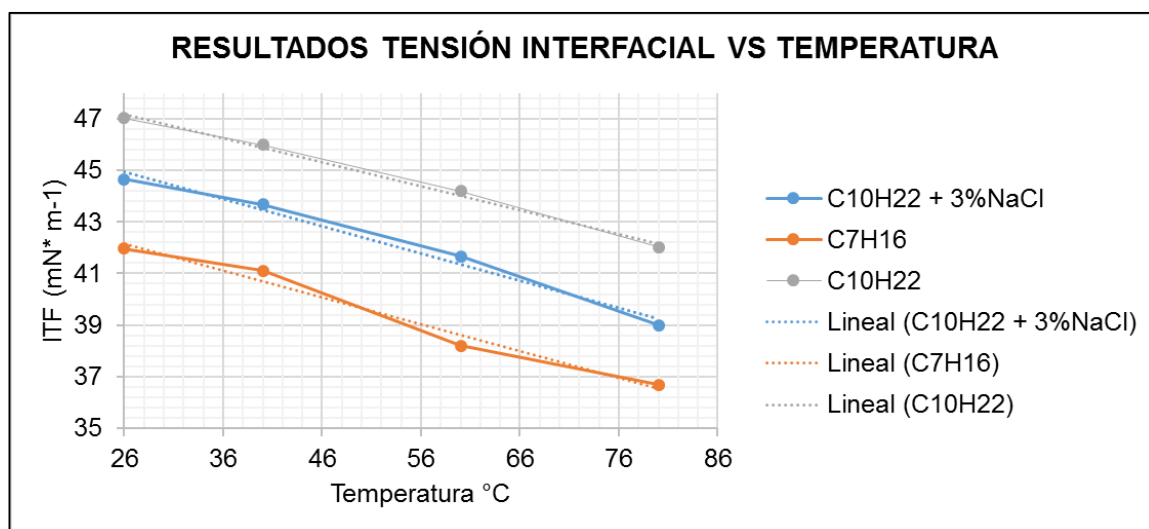


Tabla 4. Componentes de la ecuación lineal: $y = ax + b$, (a) pendiente (b) Intercepto (R^2) factor de correlación.

Sistema	a	b	R^2
	$nN*m^{-1}*C^{-1}$	$mN*m^{-1}$	
$C_{10}H_{22} + H_2O$	-0,0927	49,5810	0,9939
$(C_{10}H_{22} + 3\%NaCl) + H_2O$	-0,0962	43,9880	0,9779
$C_7H_{16} + H_2O$	-0,1037	44,8340	0,9785

- Durante las pruebas pudo comprobarse que la tensión interfacial decrece con respecto al tiempo, lo anterior ha sido documentado por varios autores (MELENDEZ J. et al, ZEPPIERI S. et al, GOEBEL. Et al), esto debido a que la gota al estar expuesta al ambiente pierde masa debido a la evaporación, lo que ocasiona que las fuerzas intermoleculares se aminoren.

- Los valores experimentales de la tensión interfacial en cada uno de los tres casos presentan un comportamiento lineal, la tabla 4 muestra los elementos de la regresión lineal para cada caso.
- Se evidencia que el sistema contaminado con salmuera presenta valores para la tensión interfacial menores al sistema que contiene el mismo hidrocarburo sin contaminante, lo anterior puede ser explicado debido a que la diferencia de densidades entre el sistema n-alcano/agua pura es menor que el mismo delta entre el sistema n-alcano/agua contaminada, lo que supondría que el número bond sería mucho mayor en el sistema n-alcano/agua contaminada lo cual representaría un menor valor de tensión interfacial, debido a que estos parámetros son inversamente proporcionales (Saad, Policova, & Neumann 2011).
- Se puede inferir mediante las pruebas que la medición de la tensión interfacial pudo haber sido afectada por excitaciones vibratorias externas por lo cual se recomienda utilizar bancadas amortiguadoras.
- Los resultados anteriormente obtenidos corroboran que El valor de la tensión interfacial para los alcanos estudiados decrece con respecto aumenta la temperatura (Inversamente proporcionales), esto debe ser tomado en cuenta para la formulación de métodos de recuperación avanzada de petróleo como inyección de polímeros o inyección de surfactantes. El comportamiento de la IFT vs T es escalable a condiciones de superficie y/o condiciones de yacimiento.
- Con los resultados obtenidos en las pruebas puede concluirse que el valor de la tensión interfacial se incrementa con respecto al número de carbonos del n-alcano siempre y cuando el sistema comparado sea homogéneo.

- El sistema de decano y agua con cloruro de sodio es el que presenta menores valores de tensión interfacial, corroborando así la importancia y la relación directa de las densidades de los componentes, por tal motivo puede concluirse que a fluidos menos densos menos valor de IFT tendrán.

6.4. COMPARACIÓN CON OTROS AUTORES

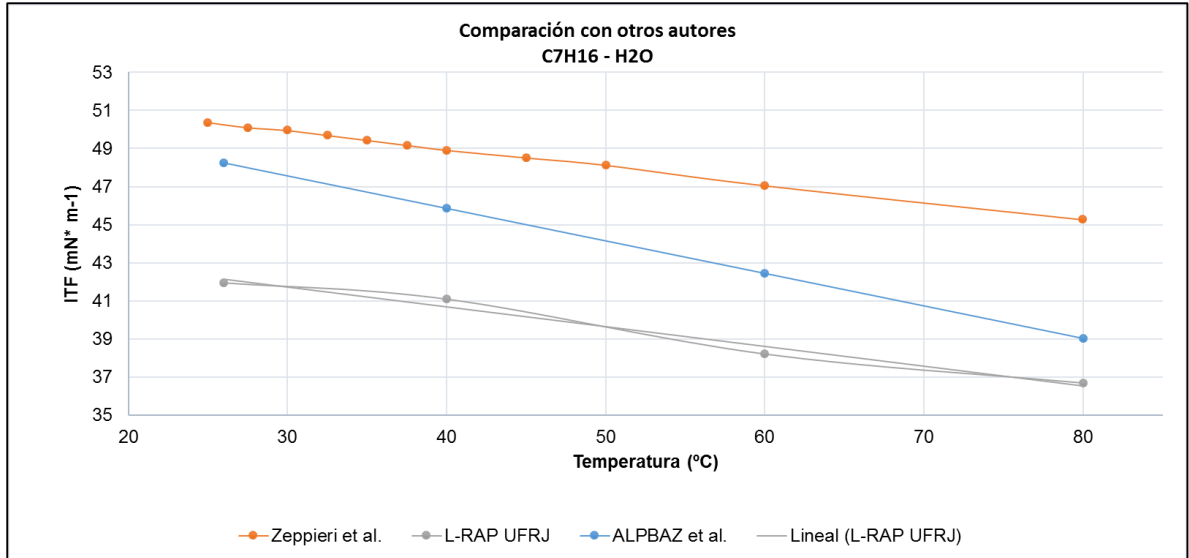
Una vez obtenidos los resultados experimentales, estos fueron comparados con otros autores para así sopesar su congruencia y determinar si el DSA HP 100 de L-RAP/UFRJ, se encontraba en condiciones de más pruebas.

Dada la complejidad de los ensayos y el valor preponderante de los factores externos en los resultados se decidió tener un margen de error del 16%, por tal motivo todos los resultados que se encuentren dentro de este valor serán considerados satisfactorias.

6.4.1 Sistema n-heptano/agua

La figura 40 muestra el contraste entre los resultados obtenidos por (Zeppieri et al, 2001), (Alpbaz et al 1981) y el equipo de trabajo de L-RAP/UFRJ. A su vez comprueba que los resultados obtenidos por el equipo autor del presente trabajo obtuvo resultados congruentes y satisfactorios.

Figura 40. Comparación con otros autores sistema Heptano/Agua.



La tabla 5 muestra los respectivos errores relativos porcentuales de los coeficientes angulares de cada una de las ecuaciones de recta mostradas en la figura 40, como es perceptible ambos Erp se encuentran en el rango de error esperado, por lo tanto, los experimentos llevados a cabo se consideran satisfactorios

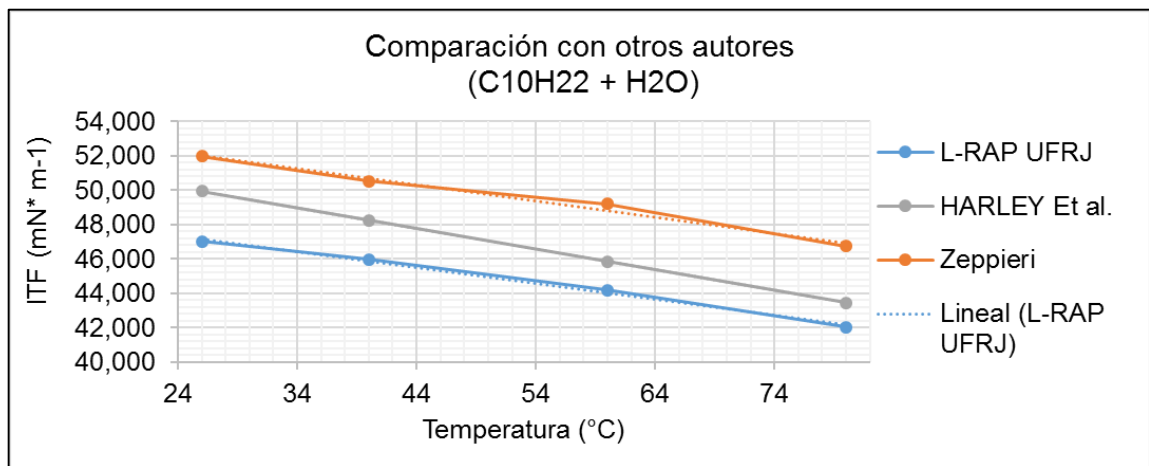
Tabla 5. Comparación de ecuación de la recta con su respectivo error relativo porcentual

RECTA	a		Erp %
	nN*m ⁻¹ *°C ⁻¹	b	
		mN*m ⁻¹	
L-RAP UFRJ	-0,1037	44,83	
Zeppieri et al.	-0,0896	52,43	15,7366
Albpaz et al.	-0,1710	52.7	0,0039

6.4.2. Sistema n-decano/agua

La figura 41 muestra el contraste entre los resultados obtenidos por (Zeppieri et al, 2001), (Harley et al) y el equipo de trabajo de L-RAP/UFRJ. A su vez comprueba que los resultados obtenidos por el equipo autor del presente trabajo obtuvo resultados congruentes y satisfactorios.

Figura 41. Comparación con otros autores sistema Heptano/Agua.



La tabla 6 muestra los respectivos errores relativos porcentuales de los coeficientes angulares de cada una de las ecuaciones de recta mostradas en la figura 40, como es perceptible ambos Erp se encuentran en el rango de error esperado, por lo tanto, los experimentos llevados a cabo se consideran satisfactorios.

Tabla 6. Comparación de ecuación de la recta con su respectivo error relativo porcentual

RECTA	a	b	Erp
	nN*m ⁻¹ *°C ⁻¹	mN*m ⁻¹	
L-RAP UFRJ	-0,0927	49,58	
Zeppieri et al.	-0,0893	53,87	3,8074
Harley et al.	-0,1205	53,0800	0,0023

7. CONCLUSIONES

- Las correlaciones obtenidas son validadas por medio de la comparación con otros autores en donde el sistema Decano + agua presentó valores de errores relativos porcentuales en relación a su coeficiente angular de 15,7 y 0,003 puntos porcentuales, a su vez el sistema Heptano + agua tuvo valores de error de 3,80% y 0,0023%, mostrando en ambos casos un valor de error relativo porcentual aceptable, por lo cual puede concluirse que los resultados obtenidos son satisfactorios; De igual manera éstos también tuvieron un buen ajuste mostrando discrepancias de únicamente 2% al ser contrastados con valores adquiridos mediante un modelo numérico desarrollado en el laboratorio empleando análisis dinámico molecular.
- Todos los resultados que se obtuvieron responden a la información obtenida teóricamente, esto quiere decir que presentan un comportamiento idéntico al presentado en la literatura.

- Dados los resultados obtenidos puede concluirse que el equipo “*Drop Shape Analyzer DSA 100 HP*”, se encuentra en óptimas condiciones para continuar los trabajos de muestreo en propiedades como tensión interfacial estática y tensión interfacial dinámica.

8. RECOMENDACIONES

- Las correlaciones para cada uno de los tres sistemas muestran un ajuste óptimo, lo que permite ser usadas posteriormente, esto conlleva a recomendar que, en próximas pesquisas y pruebas, se enfoque esfuerzo en la adquisición de correlaciones para otros n-alcanos y así enriquecer el banco de datos del laboratorio

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALPBAZ M., BILGESU A., TUTKUN O. The measurement of interfacial tension by drop-weight method. Commun Fac Sci Univ Ank Serie B. 1988, 34, 103-112.

ÁLVAREZ M., DÍAZ J., PÉREZ J. (2010). Análisis de la sensibilidad a las vibraciones del método de medición de tensión superficial mediante gota suspendida. Madrid, Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid 2-9, 2010.

ANTON D. S. Tensión Interfacial. En Cuaderno FIRP S-203 A. Mérida: Facultad de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, 2005.

BRITO Cruz. UNICAMP, 1997.

DÍAZ J., BECERRA L. O. Tensión Superficial, Importancia de las Mediciones en la Metrología de Densidad con un Valor de Incertidumbre Aceptable. Simposio de Metrología. Querétaro: Centro Nacional de Metrología, México. 2008.

FUENTES J., LÓPEZ D. R. Nuevo método para medir la tensión superficial mediante la técnica de la gota colgante. *Información Tecnológica*, 181-187, 2001.

GONZALEZ, B. C. Mojabilidad. Medición del ángulo de contacto por el método de la gota cautiva. México D.F. Tesis. Universidad Autónoma de México, 2014.

Harley JENNINGS, George NEWMAN. The effect of temperature and pressure on the interfacial tension of water against methane-normal decane mixtures. *Society of petroleum engineers Journal*, 11(02), p.171-175, 1971.

Harley JENNINGS. The effect of temperature and pressure on the interfacial tension of benzene-water and normal decane-water. *Journal of colloid and interface science*, 24(3), 323-329, 1967.

JIMENEZ D. P. Determinación Experimental de Tensión Superficial del agua en cámara micro-reológica. Madrid: Tesis. Universidad Carlos III de Madrid, 2012.

Juan MELÉNDEZ, Susana ZEPPIERI Aura LÓPEZ DE RAMOS. Diferencias entre los valores de la tensión interfacial dinámica de gotas de agua en CO₂ y burbujas de CO₂ en agua." *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela* 27.1 P. 92-99, 2012.

MEJIA, B. S. Determinación de la tensión interfacial agua –decano bajo confinamiento por técnicas de simulación molecular. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2009.

SAAD S. M., POLICOVA Z., ACOSTA E. J., NEUMANN W. A. Range of Validity of Drop Shape Techniques for Surface Tension Measurement. *Langmuir*, 26(17), 14004-14013, 2010.

SAAD S. M., POLICOVA Z., NEUMANN, W. A. Design and accuracy of pendant drop methods for surface tension measurement. Elsevier, p. 442-452, 2011.

TAMIR A., RUIZ B. F. Tensión superficial. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Alicante, 2009.

Universidad Complutense de Madrid. Ángulo de contacto. Tensión superficial e interfacial. Obtenido de Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación, 2012.

Universidad de Florida. (s.f.). Tensión superficial. Obtenido de Universidad de Florida. Campus virtual.

Universidad Jaume I. Tema 1. Alcanos. Obtenido de Grupo de síntesis Orgánica, 2010.

ZEPPIERI S., RAMÍREZ Y., MOLINA J., LÓPEZ DE RAMOS, A. L. Estudio experimental de la tensión interfacial transitoria para sistemas alcanos-agua-Tritón X-100 empleando la técnica de la gota emergente. *Información tecnológica*, 20(6), 125-135, 2009.

ZEPPIERI S., RODRÍGUEZ J., LÓPEZ DE RAMOS A. L. Interfacial tension of alkane+ water systems. Journal of Chemical & Engineering Data, 46(5), 1086-1088, 2001.

ANEXOS

Anexo 1. Metodología para la correcta medición y tratamiento de valores de tensión interfacial, obtenidos a través del DSA

