

# ÍNDICE

RESUMEN

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.3 HIPÓTESIS

CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES

3.1 PROCESOS DE PURIFICACIÓN DE GASES POR SEPARACIÓN POR  
ABSORCIÓN

3.2 ENDULZAMIENTO DE GAS NATURAL

3.3 PROBLEMAS EN LA OPERACIÓN DE ENDULZAMIENTO DE GAS NATURAL

3.4 TENSIÓN SUPERFICIAL

3.5 ESPUMAS

3.6 ANTECEDENTES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS CON ALCANOLAMINAS

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

4.1 MATERIALES

4.2 MÉTODO DE PESADA PARA LA PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES  
ACUOSAS DE ALCANOLAMINAS

4.3 MÉTODO PARA MEDIR LA DENSIDAD DE LAS SOLUCIONES ACUOSAS DE  
ALCANOLAMINAS

4.4 MÉTODO PARA MEDIR LA TENSIÓN SUPERFICIAL LÍQUIDO /VAPOR DE LAS  
SOLUCIONES ACUOSAS DE ALCANOLAMINAS

4.5 MÉTODO PARA MEDIR EL ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE ESPUMA DE LAS SOLUCIONES ACUOSAS DE ALCANOLAMINAS

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS A ESTUDIAR

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE DENSIDAD

5.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE VOLUMEN MOLAR DE EXCESO

5.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE TENSIÓN SUPERFICIAL

5.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE ESPUMA

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APÉNDICES

APÉNDICE A: ANÁLISIS CROMATOGRÁFICO DEL GAS NATURAL

APÉNDICE B: CALIBRACIÓN DE TERMÓMETROS

APÉNDICE C: CALIBRACIÓN DEL DENSÍMETRO

APÉNDICE D: CALIBRACIÓN DEL TENSIÓMETRO

APÉNDICE E: CALIBRACIÓN DEL ROTÁMETRO

## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 3.2.1. Diagrama de flujo del proceso de endulzamiento de gas natural.

Figura 3.4.1. Formación de una burbuja de gas en un líquido.

Figura 3.5.1. Formación de espuma por medio de un gas disperso en un líquido

Tabla 3.6.1. Registro de los antecedentes en el estudio de alcanolaminas

Figura 4.3.1. Principio del densímetro del tubo vibrante.

Figura 4.3.2. Esquema del densímetro de tubo vibrante Anton Paar y equipo adicional.

Figura 4.3.3. Método para la obtención de periodos de oscilación del tubo vibrante en el densímetro Anton Paar, para cada solución acuosa de alcanolamina.

Figura 4.4.1. Equipo para medir la tensión superficial FTA 200.

Figura 4.4.2. Diagrama de las actividades necesarias para obtener la tensión superficial de una sustancia.

Figura 4.4.3. Ventana inicial del software FTAVideo, para medir tensión superficial.

Figura 4.4.4. Ventana Image Analysis Setup, Pestaña Contact Angle (Izquierda), Pestaña Auto C.A. (Derecha).

Figura 4.4.5. Ventana Image Analysis Setup, Pestaña Surface Tension (Izquierda), Pestaña Calibration (Derecha.)

Figura 4.4.6. Ventana Image Analysis Setup, Pestaña Data Transfer (Izquierda), Pestaña Protractor (Derecha)

Figura 4.4.7. Ventana Image Analysis Setup, Pestaña Capillary Angle.

Figura4.4.8. Ventana Video Setup.

Figura 4.4.9. Ventana Movie Setup, Pestaña Lights (ajusta la calidad de la imagen).

Figura 4.4.10. Ventana Movie Setup, Pestaña Pump.

Figura 4.4.11. Ventana Movie Setup, Pestaña Capture.

Figura 4.4.12. Ventana Movie Setup, Pestaña Trigger/Run.

Figura 4.4.13. Ventana Movie Setup, Botón de Tensión superficial y botón de Cineloop.

Figura 4.4.14. Resultados de tensión superficial dados por el software FTA200.

Figura 4.5.1. Diagrama del espumómetro y equipos auxiliares

Figura 4.5.2. Diagrama de alturas medidas por el catetómetro en el tubo de espumación.

Figura 4.5.3. Secuencia de actividades para obtener la espumación de una sustancia.

Tabla 5.1.1. Densidad y masa molecular del agua, MIPA y 2-PE.

Tabla 5.1.2. Concentraciones en fracción molar preparadas para las soluciones acuosas de MIPA.  
( $x_1$ ) MIPA + (1- $x_1$ ) Agua.

Tabla 5.1.3. Concentraciones en fracción molar preparadas para las soluciones acuosas de 2-PE.  
( $x_1$ ) 2-PE + (1- $x_1$ ) Agua.

Tabla 5.2.1. Constantes A y B del densímetro en el sistema Nitrógeno-Agua para la medición de las soluciones acuosas de MIPA y 2-PE a 298.15 K.

Tabla 5.2.2. Concentración en fracción molar ( $x_1$ ) de las soluciones de MIPA estudiadas, registro del promedio del periodo de oscilación y las densidades obtenidas en el intervalo de N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, a 298.15 K.

Tabla 5.2.3. Concentración en fracción molar ( $x_1$ ) de las soluciones de 2-PE estudiadas, registro del promedio del periodo de oscilación y las densidades obtenidas en el intervalo de N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, a 298.15 K.

Figura 5.2.4. Gráfica de la densidad experimental de las soluciones acuosas de MIPA como función de la concentración, a 298.15 K.

Figura 5.2.5. Gráfica de la densidad experimental de las soluciones acuosas de 2-PE como función de la concentración, a 298.15 K.

Tabla 5.2.6. Registro de los periodos de oscilación para las soluciones acuosas de MIPA.

Tabla 5.2.7. Registro de los periodos de oscilación para las soluciones acuosas de 2-PE.

Tabla 5.3.1. Volumen molar de exceso de las soluciones acuosas de MIPA, a 298.15K. (1=MIPA, 2=H<sub>2</sub>O).

Tabla 5.3.2. Volumen molar de exceso de las soluciones acuosas de 2-PE, a 298.15K. (1=2-PE, 2=H<sub>2</sub>O).

Figura 5.3.3. Volumen molar de exceso de las soluciones acuosas de MIPA, a 298.15 K.

Figura 5.3.4. Volumen molar de exceso de las soluciones acuosas de 2-PE, a 298.15 K.

Tabla 5.4.1. Tabla de comparación de tensión superficial de soluciones de MIPA, a 298.15 K.

Figura 5.4.2. Comparación de datos de tensión superficial de las soluciones acuosas de MIPA.

Tabla 5.4.3. Tensión superficial experimental de soluciones de 2-PE, a 298.15 K.

Figura 5.4.4. Resultados experimentales de tensión superficial de las soluciones acuosas de 2-PE.

Tabla 5.4.5. Registro de los resultados de tensión superficial para las soluciones acuosas de MIPA.

Tabla 5.4.6. Registro de los resultados de tensión superficial para las soluciones acuosas de 2-PE.

Tabla 5.5.1. Tabla de índice de estabilidad de espuma de soluciones acuosas de MIPA en concentración de (10, 30 y 50) % masa, a 313.15 K, empleando gas natural.

Figura 5.5.2. Gráfica de índice de estabilidad de espuma contra tiempo de las soluciones acuosas de MIPA, a 313.15 K.

Tabla 5.5.3. Tabla de índice de estabilidad de espuma de soluciones acuosas de 2-PE en concentración de (10, 30 y 50) % masa, a 313.15 K, empleando gas natural

Figura 5.5.4. Gráfica de índice de estabilidad de espuma contra tiempo de las soluciones acuosas de 2-PE, a 313.15 K.

Tabla 5.5.5. Índice de estabilidad de espuma soluciones acuosas de DEA, MDEA, AMP, MIPA y 2-PE a 313.15 K, en concentraciones de (10, 30 y 50) % masa.

Figura 5.5.6. Gráfica de índice de estabilidad de espuma contra tiempo de las soluciones acuosas de concentración 10 % masa a 313.15 K.

Figura 5.5.7. Gráfica de índice de estabilidad de espuma contra tiempo de las soluciones acuosas de concentración 30 % masa a 313.15 K.

Figura 5.5.8. Gráfica de índice de estabilidad de espuma contra tiempo de las soluciones acuosas de concentración 50 % masa a 313.15 K.

Tabla 5.5.9. Registro de las alturas, e índice de estabilidad de espuma para las soluciones acuosas de MIPA.

Tabla 5.5.10. Registro de las alturas, e índice de estabilidad de espuma para las soluciones acuosas de 2-PE.

Tabla 5.5.11. Registro de las alturas, e índice de estabilidad de espuma para las soluciones acuosas de AMP.

Tabla A.1. Análisis cromatográfico del gas natural de la línea comercial del Instituto Mexicano del Petróleo.

Tabla B.1. Registro de las temperaturas tomadas cada 5 minutos de los termómetros Chub, Systemtechnik y baño térmico.

Tabla B.2. Comparación de los promedios de cada lectura de temperatura de los termómetros Systemtechnik y baño térmico contra el termómetro de referencia Chub-E4.

Figura B.3. Gráfica de Calibración del termómetro Systemtechnik

Figura B.4. Gráfica de calibración del termómetro del baño térmico Polyscience.

Tabla C.1. Registro de los periodos de oscilación y temperaturas de los compuestos de calibración del densímetro Anton Paar para el módulo de oscilación de alta presión DMA-512.

Tabla C.2. Registro de los periodos de oscilación y temperaturas de los compuestos de calibración del densímetro Anton Paar para el módulo de oscilación de baja presión DMA-602H.

Tabla C.3. Registro de la temperatura, densidad reportada en bibliografía, periodo registrado por el densímetro, autor y año del artículo de donde se obtuvieron los datos de densidad para la calibración del módulo oscilador DMA-512.

Tabla C.4. Registro de la temperatura, densidad reportada en bibliografía, periodo registrado por el densímetro, autor y año del artículo de donde se obtuvieron los datos de densidad para la calibración del módulo oscilador DMA-602H.

Tabla C.5. Constantes A y B del densímetro para los sistemas Nitrógeno-Agua y Nitrógeno-Etilenglicol para el módulo oscilador DMA-512.

Tabla C.6. Constantes A y B del densímetro para los sistemas Nitrógeno-Agua y Nitrógeno-Etilenglicol para el módulo oscilador DMA-602H.

Tabla C.7. Tabla de comparación de la densidad experimental contra la reportada del compuesto Octano, en sistemas de Nitrógeno-Agua y Nitrógeno-Etilenglicol, para el módulo oscilador de alta presión DMA-512.

Tabla D.1. Registro de resultados de tensión superficial con agua calidad HPLC a 298.15 K para la calibración del tensiómetro, para soluciones acuosas de MIPA.

Tabla D.2. Registro de resultados de tensión superficial con agua calidad HPLC a 298.15 K para la calibración del tensiómetro, para soluciones acuosas de 2-PE.

Figura E.1. Componentes del rotámetro marca Cole Parmer.

Figura E.2. Arreglo para la verificación del apropiado funcionamiento del medidor de vía húmeda.

Figura E.3. Configuración para la calibración del rotámetro.

Tabla E.4. Flujos volumétricos correspondientes a cada altura en el rotámetro.

Figura E.5. Gráfica de la altura de la columna graduada contra los flujos promedios registrados.

