



JOCYTEC

Jóvenes en la Ciencia y la Tecnología

Revista de divulgación científica y tecnológica multidisciplinaria



Julio-Diciembre - 2024

Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología

No.02, Año 01

ISSN 3061-7448

Información legal

Revista “JOCYTEC”, Jóvenes en la ciencia y la tecnología. Revista de divulgación científica y tecnológica multidisciplinaria, Año 1, número 2, julio-diciembre 2024, es una publicación electrónica semestral sobre investigación y tecnología multidisciplinarias, relacionada con las Ingenierías y Ciencias Básicas, editada por la Universidad Autónoma de Tlaxcala a través de la Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Calzada Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala, C.P. 90300, Tel. +52(241)70249, <https://ingenieria.uatx.mx/revistas3.html>. Editor responsable jocytec.editor@uatx.mx, Dra. Shirley Carro Sánchez,. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-061312031700-102, ISSN: 3061-7448, ambos entregados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Calzada Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala, C.P. 90300, México. Tel. +52(241)70249, Dra. Shirley Carro Sánchez, fecha de última modificación, 18 de diciembre de 2024.

La responsabilidad de los textos publicados en la revista JOCYTEC recae exclusivamente en los autores y su contenido no refleja necesariamente el criterio de la Institución. Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.

Revista:
JOCYTEC

Año 01, No. 2

ALCANCE

Revista “JOCYTEC, jóvenes en la ciencia y la tecnología. Revista de divulgación científica y tecnológica multidisciplinaria” es una publicación semestral (Enero-Junio y Julio-Diciembre) de acceso abierto sobre investigación y tecnología multidisciplinarias, relacionada con las Ingenierías y Ciencias Básicas. El objetivo de la revista es ofrecer un espacio en el que se presenten investigaciones científicas y/o tecnológicas llevadas a cabo por estudiantes de licenciatura en conjunto con profesionistas, con el fin de promover el desarrollo científico y tecnológico del país. Se publican revisiones, artículos de investigación original, reportes de investigación corta o de desarrollo tecnológico, en todas las áreas de la Ingeniería. Los artículos pueden ser escritos ya sea en español o en inglés, con título, resumen y palabras clave en ambos idiomas y deberán ser inéditos y no estar postulados simultáneamente en otras revistas u órganos editoriales

**Revista:
JOCYTEC**

Año 01, No. 2

JOCYTEC
Año 1, No. 2
Julio-Diciembre 2024
CONTENIDO

Revista:
JOCYTEC

- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA SIMULACIÓN DE ESQUEMAS DE DESTILACIÓN INTENSIFICADOS PARA EL FRACCIONAMIENTO DE GAS NATURAL LICUADO UTILIZANDO UNISIM DESIGN.** 1
SENSITIVITY ANALYSIS IN THE SIMULATION OF INTENSIFIED DISTILLATION SCHEMES FOR LIQUEFIED NATURAL GAS FRACTIONATION USING UNISIM DESIGN.
José Iván Mejía-Juárez, Moisés Lobatón-Montiel, Brian Manuel Gonzalez-Contreras, Elsa Hynmar Fernández-Martínez
- CONTROL DE LA MICROESTRUCTURA DE UN COPOLÍMERO A PARTIR DE MONÓMEROS CON ALTA DIFERENCIA EN REACTIVIDAD EN PROCESO EN SOLUCIÓN. PARTE 1: MODELADO.** 11
MICROSTRUCTURE CONTROL FOR COPOLYMERS OBTAINED FROM MONOMERS WITH HIGH DIFFERENCE IN REACTIVITY BY SOLUTION POLYMERIZATION. PART 1: MODELING.
Pedro R. García-Morán, Enedina Flores-Tlilayatzí, Jorge Castillo-Tejas, Shirley Carro.
- SIMULACIÓN DINÁMICA Y DIMENSIONAMIENTO DE UNA VAPORIZACIÓN INSTANTÁNEA ADIABÁTICA UTILIZANDO UNISIM DESIGN.** 18
DYNAMIC SIMULATION AND SIZING OF AN ADIABATIC FLASH USING UNISIM DESIGN.
Moisés Lobatón-Montiel, José Iván Mejía-Juárez, Elsa Hynmar Fernández-Martínez, Brian Manuel González-Contreras
- CONTROL DE LA MICROESTRUCTURA DE UN COPOLÍMERO A PARTIR DE MONÓMEROS CON ALTA DIFERENCIA EN REACTIVIDAD EN PROCESO EN SOLUCIÓN. PARTE II: RESULTADOS EXPERIMENTALES.** 26
MICROSTRUCTURE CONTROL FOR COPOLYMERS OBTAINED FROM MONOMERS WITH HIGH DIFFERENCE IN REACTIVITY BY SOLUTION POLYMERIZATION. PART II: EXPERIMENTAL RESULTS
Shirley Carro, Enedina Flores-Tlilayatzí, Yolanda del Ángel Vargas, Friné López-Medina, Pedro R. García-Morán

Año 01, No. 2

COMPARACIÓN DE MÉTODOS INDIRECTOS PARA LA MEDICIÓN DEL RADIO TERRÁQUEO, PROPUESTA BASADA EN LA DENSIDAD 35
COMPARISON OF INDIRECT METHODS FOR MEASURING THE EARTH'S RADIUS, A PROPOSAL BASED ON DENSITY
Jorge Ordoñez-Briones, Alexander Martínez-Delgado, Daniela Flores – López, M.A. Carrasco-Aguilar

VENCIENDO AL TIEMPO: MATEMÁTICAS QUE PERDURAN 46
BEATING TIME: MATHEMATICS THAT LASTS.
Brian Candia-Arochi, Misael Hernández-Hernández, Fernando Muñoz-Bautista, Araceli López-y-López

**Revista:
JOCYTEC**

Año 01, No. 2

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA SIMULACIÓN DE ESQUEMAS DE DESTILACIÓN INTENSIFICADOS PARA EL FRACCIONAMIENTO DE GAS NATURAL LICUADO UTILIZANDO UNISIM DESIGN.

SENSITIVITY ANALYSIS IN THE SIMULATION OF INTENSIFIED DISTILLATION SCHEMES FOR LIQUEFIED NATURAL GAS FRACTIONATION USING UNISIM DESIGN.

José Iván Mejía-Juárez, Moisés Lobatón-Montiel, Brian Manuel Gonzalez-Contreras, Elsa Hynmar Fernández-Martínez*

¹Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Calzada Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala, 90300, México

*Email: elsahynmar.fernandez@uatx.mx

Recibido: 03 de junio de 2024

Aceptado: 25 de agosto de 2024

RESUMEN

Las secuencias de destilación térmicamente acopladas se consideran procesos intensificados, en los cuales se reducen los consumos energéticos y, por consiguiente, los costos de inversión y de operación disminuyen también. En este trabajo, se realizó una comparación entre distintos esquemas de destilación mediante las simulaciones en estado estable del fraccionamiento de gas natural licuado para obtener n-propano, i-butano y n-butano con altas puridades. El objetivo de proponer esquemas diferentes al convencional consiste en reducir el consumo energético total en la columna. Los esquemas de destilación en estudio son del tipo convencional con separaciones directa e indirecta respectivamente; convencional-prefraccionador, en donde los componentes clave intermedios se reparten en el domo y fondo de la columna y finalmente un arreglo de 2 columnas, una convencional y una columna de pared divisoria. Se observó que las cargas térmicas disminuyeron en los arreglos convencional-prefraccionador y convencional-columna de pared divisoria comparadas con el sistema convencional. Asimismo el efecto de variar el flujo de alimentación sobre las cargas térmicas en todos los sistemas es directamente proporcional cuantitativamente; y se muestra el comportamiento de los perfiles de temperatura y composición de algunas columnas. Las simulaciones se llevaron a cabo en el simulador UniSim Desing V6.75 y el modelo termodinámico para predecir el equilibrio líquido-vapor fue la ecuación de estado cúbica de Peng-Robinson.

Palabras Clave: ahorros energéticos, fraccionamiento, intensificación de procesos, gas natural licuado, destilación térmicamente acoplada.

ABSTRACT

Thermally coupled distillation sequences are considered as intensified processes, in which energy consumption is reduced and, consequently, investment and operating costs decrease as well. In this work, a comparison between different distillation schemes was performed by means of steady state simulations of liquefied natural gas fractionation to obtain n-propane, i-butane, and n-butane with high purities. The objective of proposing schemes different from the conventional one is to

reduce the total energy consumption in the column. The distillation schemes under study are of the conventional type with direct and indirect separations respectively; conventional-prefractionator, where the key intermediate components are distributed in the dome and bottom of the column and finally an arrangement of 2 columns, one conventional and one partition wall column. It was observed that the thermal loads decreased in the conventional-prefractionator and conventional-split-wall column arrangements compared to the conventional system. Also, the effect of varying the feed flow on the thermal loads in all systems is directly proportional quantitatively; and the behavior of the temperature and composition profiles of some columns is shown. The simulations were carried out in the UniSim Desing V6.75 simulator and the thermodynamic model to predict the vapor-liquid equilibrium was the Peng-Robinson cubic equation of state.

Keyword: energy savings, fractionation, process intensification, liquefied natural gas, thermally coupled distillation.

1. INTRODUCCIÓN

La destilación continúa siendo, uno de los procesos de separación más utilizados y viables en la industria de la ingeniería química, aún cuando se considera una operación intensiva. Los diseños sostenibles y la operabilidad eficiente de los sistemas de separación son relevantes en la economía de la industria de procesos químicos (Seihoub y col., 2017). Con la finalidad de mejorar los esquemas de destilación convencionales se proponen algunos esquemas (Long y Lee, 2012), incluyendo a las columnas de pared divisoria (DWC por sus siglas en inglés), donde se observan ahorros energéticos considerables.

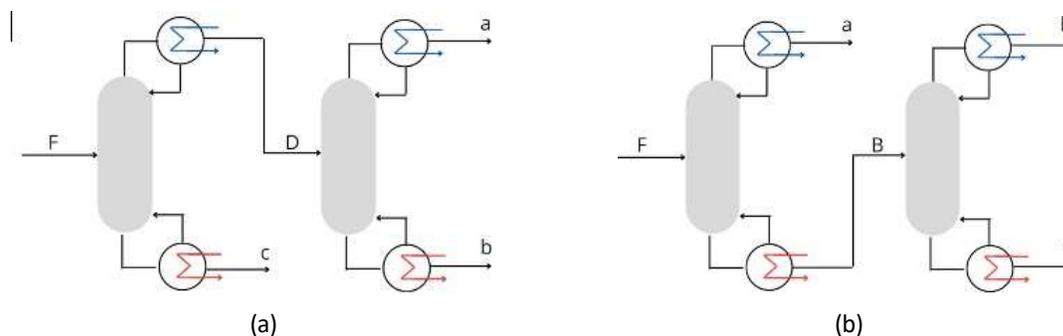
El fraccionamiento de gas natural licuado (GNL) es un proceso que permite separar los componentes del gas natural en componentes más ligeros, como etano, propano, butano y otros hidrocarburos de interés. El GNL es una fuente de energía importante, y su fraccionamiento se ha vuelto más eficiente gracias a la utilización de tecnologías avanzadas de destilación como las DWC y la optimización de procesos para reducir los costos de energía (Rahimi y col., 2015).

La primera planta piloto de licuefacción de gas natural en los Estados Unidos fue la Planta Experimental de Licuefacción de Gas Natural de Dow Chemical Company, también conocida como "Methane Pioneer" y fue construida en Cleveland, Ohio, comenzando a operar en 1941. La planta piloto Methane Pioneer fue diseñada para investigar y desarrollar técnicas de licuefacción de gas natural a escala industrial. El objetivo principal era demostrar la factibilidad técnica y económica de convertir el gas natural en forma líquida para facilitar su almacenamiento y transporte. Al descubrirse su alto valor como combustible debido a la capacidad para proporcionar una combustión limpia y cumplir con requisitos rigurosos medioambientales, el GNL se ha convertido en una opción de combustible menos perjudicial para el medio ambiente en comparación con otros combustibles fósiles. Por consiguiente, cada vez son más los países que lo producen, y la demanda del mismo se ha disparado, superando los 350 millones de toneladas anuales en 2017 en todo el mundo (Silveira, 2021). Posteriormente se construyó la primera planta de fraccionamiento GNL en los Estados Unidos en 1959 en West Virginia, que pertenecía a la empresa Equitable Gas Company. Esta planta fue construida con la finalidad de separar los componentes del gas natural y producir propano y butano para uso doméstico y comercial. Asimismo, fue un importante avance en la industria del gas natural, ya que permitió una mayor flexibilidad en la producción de diferentes hidrocarburos a partir del gas natural. En la actualidad, Estados Unidos cuenta con numerosas plantas de fraccionamiento de GNL en operación y continúa siendo un importante productor de

hidrocarburos a nivel mundial. El fraccionamiento del GNL sigue siendo una técnica esencial en la industria química y de energía, y la tecnología ha evolucionado para hacer el proceso más eficiente y rentable.

El número de columnas de destilación requeridas en el proceso de fraccionamiento de GNL depende de los productos finales que se deseen obtener. En los sistemas convencionales, los cuales son los más empleados en la industria, se utilizan diferentes tipos de columnas como la des-etanizadora, la des-propanizadora, la des-butanizadora, entre otras (Khaled y col., 2018). El GNL suele tener un mayor valor comercial como productos separados que como parte de una mezcla de gas natural. Las fracciones más ligeras de GNL, como el etano, propano y butanos, pueden venderse como combustible o materia prima a refinerías y plantas petroquímicas, mientras que las fracciones más pesadas se utilizan como gasolina. La destilación es el proceso de separación primario ampliamente utilizado en el procesamiento del GNL, sin embargo, su principal inconveniente es su alto consumo de energía, lo que puede afectar significativamente la rentabilidad general de la planta.

La separación de un sistema ternario requiere de dos columnas convencionales y se lleva a cabo mediante tres formas, denominadas secuencias, en la Figura 1(a) se muestra la secuencia directa, en donde, se separa el componente clave ligero en la primera columna, posteriormente en la segunda columna se obtienen como productos los componentes clave intermedio y clave pesado en destilado y fondos respectivamente. En el esquema de la Figura 1(b) está representada la secuencia indirecta, donde se separa el componente clave pesado en la primera columna y posteriormente se obtienen el clave ligero e intermedio. La Figura 1(c) es la secuencia de separación preferida, en esta, el componente clave intermedio se distribuye entre el domo y el fondo de la siguiente columna, lo que produce flujos mínimos de líquido y vapor produciendo menores gastos energéticos a lo largo de la columna y en consecuencia también disminuye la energía en el condensador y el rehervidor; finalmente en la Figura 1(d) se representa una columna de pared divisoria convencional CDWC, donde la pared se localiza a la mitad del tanque. La DWC es equivalente termodinámicamente al sistema Petlyuk, este esquema está formado por dos columnas, la primera denominada prefractionador y es donde se lleva a cabo una separación preferida y la segunda es la columna principal, donde se obtienen los tres productos con altas purzas; ambas columnas se encuentran interconectadas por cuatro corrientes que suplen al condensador y al rehervidor, por lo cual se les denomina esquemas de destilación térmicamente acoplados, este tipo de sistemas intensificados muestran ahorros energéticos y de costos importantes.



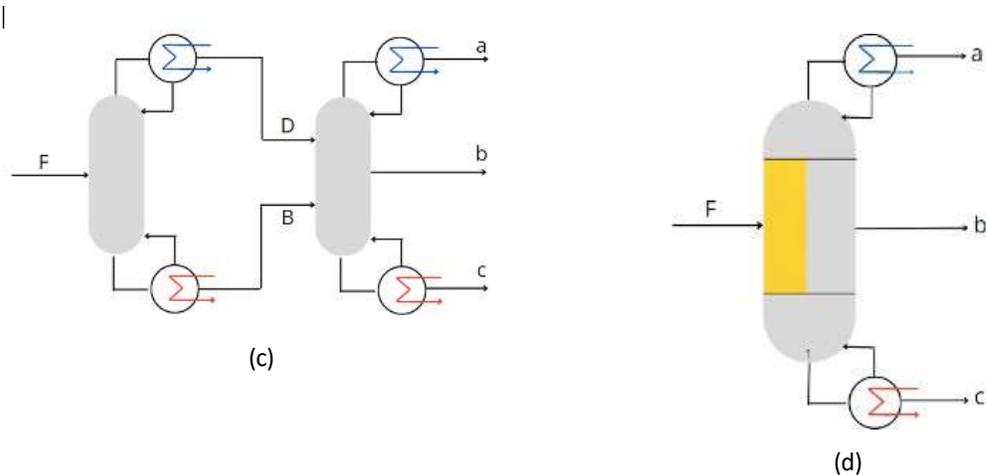


Figura 1. Tipos de secuencias: (a) Directa, (b) Indirecta, (c) Preferida y (d) DWC.

Los sistemas de destilación térmicamente acoplados se sugieren como una de las mejores alternativas en los procesos de separación dentro del área de intensificación de procesos, debido a que aumentan la eficiencia de la columna, muestran ahorros de energía entre el 30% y 40%, se disminuyen los costos de capital y de operación y se ahorra espacio. La DWC es uno de los esquemas de destilación que se encuentra operando con un poco más de 100 columnas a nivel mundial en el sector industrial. Esta columna presenta una menor huella de carbono, comparada con las columnas convencionales y en consecuencia tiene un menor impacto ambiental. La simulación de la DWC se lleva a cabo mediante el sistema Petlyuk, debido a que en los simuladores aún no existe el modelo para resolver la DWC directamente. El arreglo de doble prefraccionador es efectivo para la separación de mezclas de hidrocarburos, ya que permite una mayor eficiencia en la separación de componentes de alta volatilidad y una reducción en la cantidad de energía requerida para la separación. También ha sido aplicada en la separación de otros compuestos químicos, como productos farmacéuticos y solventes; en trabajos futuros se pretende aplicar dicho esquema este caso de estudio con la finalidad de conseguir los ahorros energéticos mostrados en la literatura.

En este trabajo se hizo una comparación de las cargas energéticas entre tres configuraciones: convencional, convencional-prefraccionador y convencional-DWC mediante las simulaciones para el fraccionamiento de GNL en UniSim Design. Asimismo se realizó una variación en el flujo de alimentación del +20% para los tres esquemas en estudio y ver su impacto en la energía de separación. Los resultados de las simulaciones muestran que se alcanzan las purezas deseadas, también se muestran los perfiles tanto de temperatura como de composición del líquido de algunas columnas de los sistemas simulados y las los ahorros energéticos en los sistemas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se llevaron a cabo simulaciones en estado estable en UniSim Design V6.75 para el fraccionamiento de GNL, y así obtener propano, *n*-butano e *i*-butano puros y mostrar los ahorros energéticos en dos de los sistemas propuestos, ya que se considera que no hay ahorros en el sistema convencional. Asimismo, se presentan los comportamientos de los perfiles de composición y temperatura. El Equilibrio Líquido-Vapor (ELV) se estimó con la ecuación de estado de Peng-Robinson, ya que este modelo predice adecuadamente las propiedades de hidrocarburos. Se consideró una alimentación de hidrocarburos (C₂-C₇) como líquido saturado, con un flujo de 233557.11 kg/h y una composición según (Long y Lee, 2012). Las variables especificadas para todas

las simulaciones fueron las purzas de los productos: Propano (90.14% vol), *n*-Butano (95% vol), *i*-Butano (97% vol) y componentes pesados (99% vol).

Se consideraron tres esquemas de destilación con la finalidad de comparar las cargas térmicas y calcular los ahorros energéticos del proceso en estudio. El primero es una secuencia convencional (Long y Lee, 2012) que tiene 3 columnas donde se llevan a cabo secuencias de separación directa e indirecta (Figura 2). La primera columna es una des-propanizadora, la cual tiene 34 etapas teóricas, la presión de operación en el condensador de esta columna es de 17.5 bar, presión a la cual el propano se puede condensar con agua de refrigeración. La siguiente columna es la des-butanizadora, que posee 40 etapas teóricas, se alimenta en la etapa 22, con una presión de operación en condensador y rehervidor de 3.5 bar y 4.1 bar respectivamente y finalmente la des-isobutanizadora, que tiene 92 etapas teóricas y es alimentada en la etapa 53, con una presión de operación en condensador y rehervidor de 4.4 bar y 5.5 bar respectivamente, la destilación final es intensiva en energía debido a la pequeña volatilidad relativa entre el Butano y su isómero.

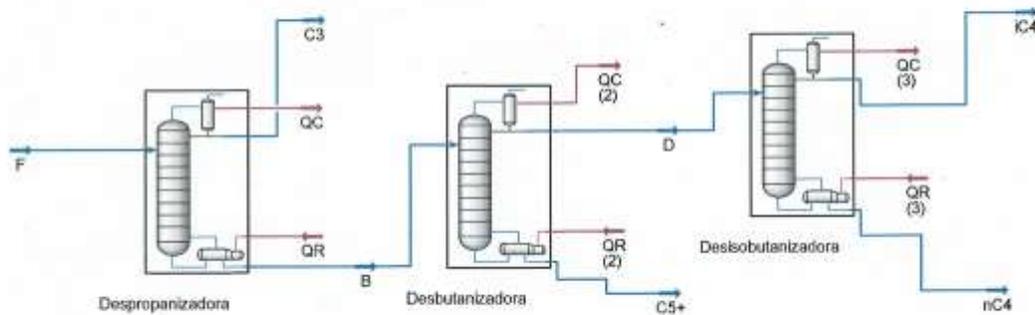


Figura 2. Sistema de destilación convencional del fraccionamiento de GNL (UniSim Design).

El segundo sistema de destilación en estudio mostrado en la Figura 3 está formado por una columna convencional y 2 prefraccionadores (Long y Lee, 2012), que para fines prácticos en este documento llamaremos sistema convencional-prefraccionador. La columna 1 posee 34 etapas con una presión de operación en el condensador de 14 bar y una caída de presión de 0.016 bar a través de la columna. La siguiente columna que es el primer prefraccionador tiene 40 etapas a las mismas condiciones de presión, esta columna es alimentada en las etapas 14 y 36 y con una extracción lateral de vapor en la etapa 20. El segundo prefraccionador con 92 etapas se alimenta en las etapas 12 y 58, con una extracción lateral en la etapa 19 purificándose el *i*-Butano.

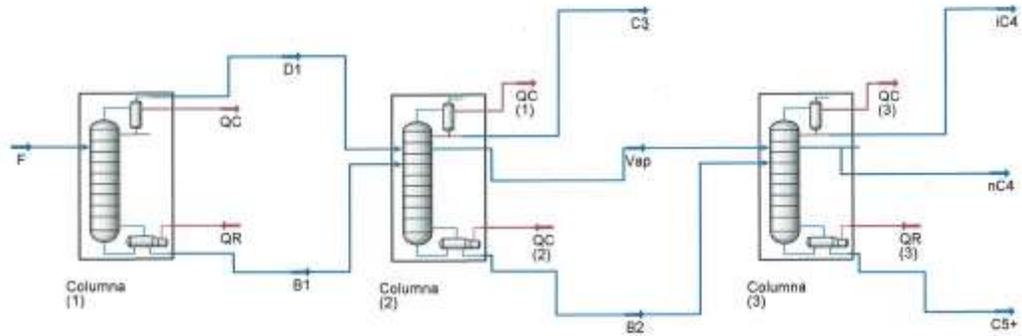


Figura 3. Esquema de destilación convencional-prefracionador para el fraccionamiento de GNL (UniSim Design)

Finalmente, el tercer arreglo mostrado en la Figura 4 es un sistema convencional-DWC, en el cual la columna convencional (des-propanizadora) tiene 34 etapas, obteniéndose el Propano como producto, la presión en la parte superior e inferior es de 4.3 bar y 5.4 bar respectivamente. La DWC se simuló según el arreglo Petlyuk, para el cual, el prefracionador posee 40 etapas con corrientes de interconexión de las corrientes líquida y vapor en las etapas 9 y 49 en las zonas inferior y superior respectivamente de la columna principal, de donde se obtienen los productos: *i*-Butano e *n*-Butano y pesados en destilado, extracción lateral y fondos.

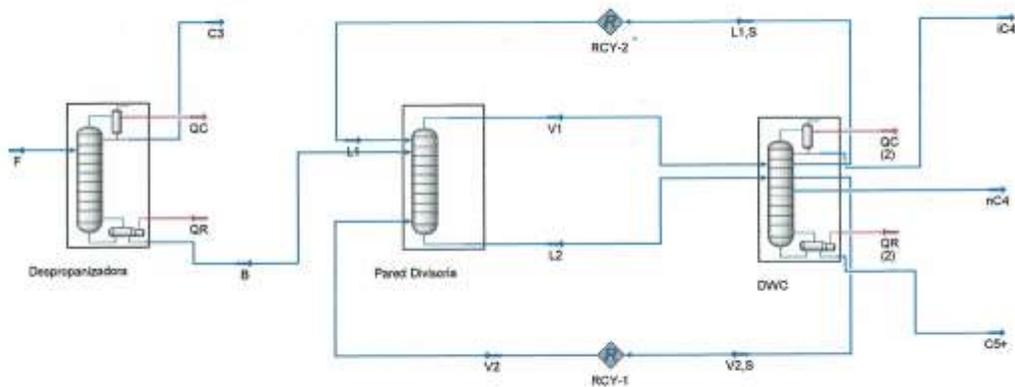


Figura 4. Sistema de destilación convencional-DWC para el fraccionamiento de GNL (UniSim Design).

Como puede observarse el número de etapas en cada sistema de destilación se mantuvo constante, ya que este es un caso industrial del fraccionamiento de GNL. Asimismo se llevaron a cabo simulaciones variando el flujo de alimentación (+-20%) con la finalidad de observar el efecto de este

sobre las cargas térmicas de condensadores y rehervidores en los 3 sistemas propuestos y así analizar el comportamiento en los perfiles de composición en algunas de las columnas de estos esquemas.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo de este trabajo consistió en comparar las cargas térmicas entre los esquemas de destilación propuestos a partir de los resultados obtenidos por las simulaciones en estado estable en UniSim Design para el fraccionamiento de GNL. Y también, otro de los objetivos fue la comparación entre simuladores, debido a que en Long y Lee (2012) emplearon Hysys para realizar sus simulaciones.

A partir de las simulaciones se obtuvieron las cargas térmicas de todos los condensadores y rehervidores de cada columna y se calculó la energía total en cada esquema de destilación, posteriormente se determinó el porcentaje de ahorro de energía de los esquemas convencional-prefraccionador y convencional-DWC con respecto al sistema convencional, los cuales se muestran en la Tabla 1, como también se observan los ahorros energéticos al variar el flujo de alimentación +-20%. Puede notarse que no hay un efecto significativo del ahorro de energía con la variación del flujo y es importante resaltar que el cambio de la carga térmica con respecto a la variación del flujo es lineal y directamente proporcional cuantitativamente.

Tabla 1. Ahorros energéticos en los esquemas de destilación y en la variación del flujo de alimentación

Sistema	Ahorro energético [%]		
	Alimentación		
	normal	[+20%]	[-20%]
Convencional	-	-	-
Convencional-Prefraccionador	17.48	17.49	17.47
Convencional-DWC	15.56	14.49	14.17

Las diferencias entre los ahorros energéticos de los esquemas Convencional-Prefraccionador y Convencional-DWC son pequeñas, pero la ventaja que presenta el sistema que contiene la DWC se ve reflejado en los costos tanto de inversión como de operación, debido a que las corrientes de interconexión suplen al condensador y rehervidor que existen en el arreglo Convencional-Prefraccionador, dado que los costos operativos representan alrededor del 88% del costo total anual derivado de los servicios auxiliares en estos intercambiadores de calor de las columnas de destilación. Además al ser una DWC, sólo se requiere de un tanque con una pared que divide al prefraccionador y a la columna principal, lo que reduce los costos de capital, ya que los tanques representan alrededor del 57% de estos costos.

Los perfiles de temperatura de la des-propanizadora son similares entre los tres esquemas de destilación, es importante resaltar que los perfiles de los dos prefraccionadores del sistema Convencional-Prefraccionador (Figuras 5 y 6) son semejantes a los perfiles del prefraccionador y columna principal de la DWC en el esquema Convencional-DWC. Los perfiles de temperatura son importantes como resultado de una simulación, debido a que la composición es función de la temperatura, por lo que su comportamiento a través de la columna determina la pureza que se

desea alcanzar en los productos. Los perfiles de temperatura mostrados en las Figuras 5 y 6 no

tienen perturbaciones en el flujo de alimentación y la etapa 0 es el condensador y la etapa N es el re-hervidor.

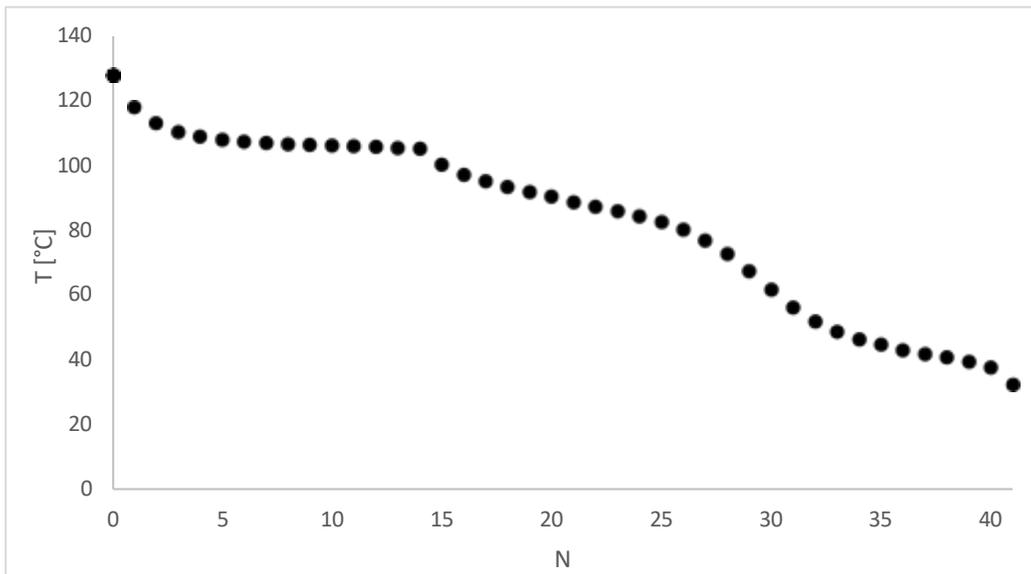


Figura 5. Perfil de temperatura en el prefractionador 1 del sistema Convencional-Prefractionador.

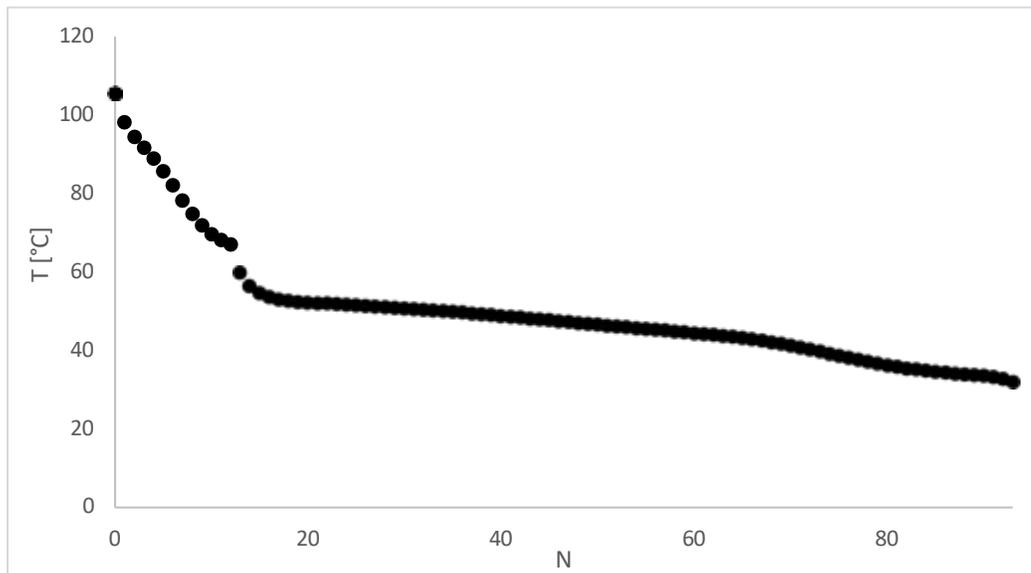


Figura 6. Perfil de temperatura en el prefractionador 2 del sistema Convencional- Prefractionador.

En las Figuras 7 y 8 se observan los perfiles de composición del líquido para el prefractionador y columna principal del sistema Convencional-DWC, sin cambio en el flujo de alimentación. Con base a los cambios que se hicieron en el flujo de alimentación, el comportamiento en esta composición es similar a los obtenidos para las simulaciones con variaciones del $\pm 20\%$ en el flujo de alimentación y también son semejantes a las columnas del primer y segundo prefractionador en el esquema Convencional-Prefractionador.

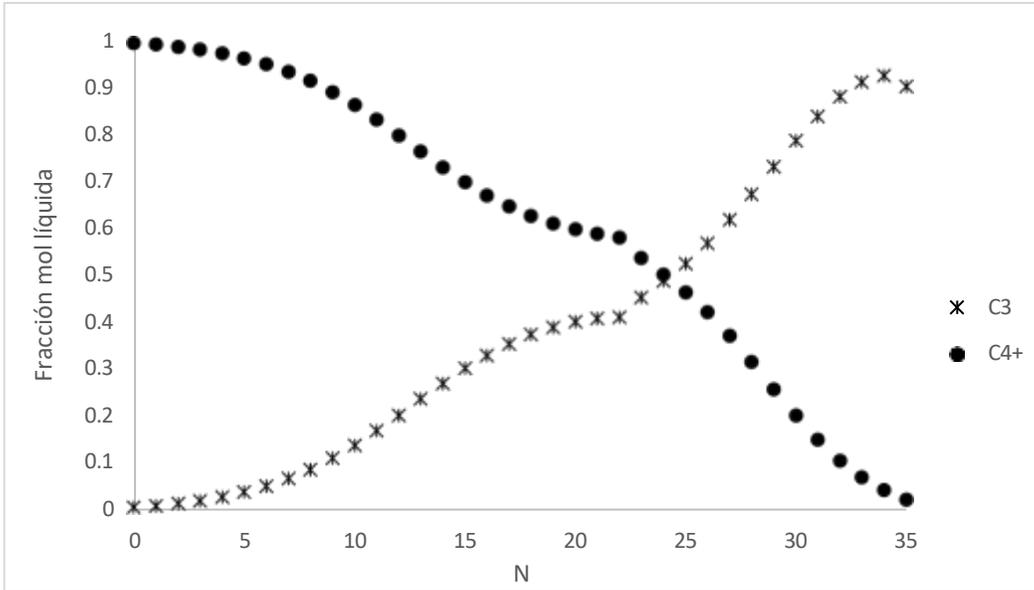


Figura 7. Perfil de composición en la despropanizadora del sistema Convencional-DWC.

En el prefraccionador del sistema Convencional-DWC se separa el Propano de los demás compuestas, en esta Figura 7 se logra observar esta separación con el comportamiento clásico de separación en una columna de destilación.

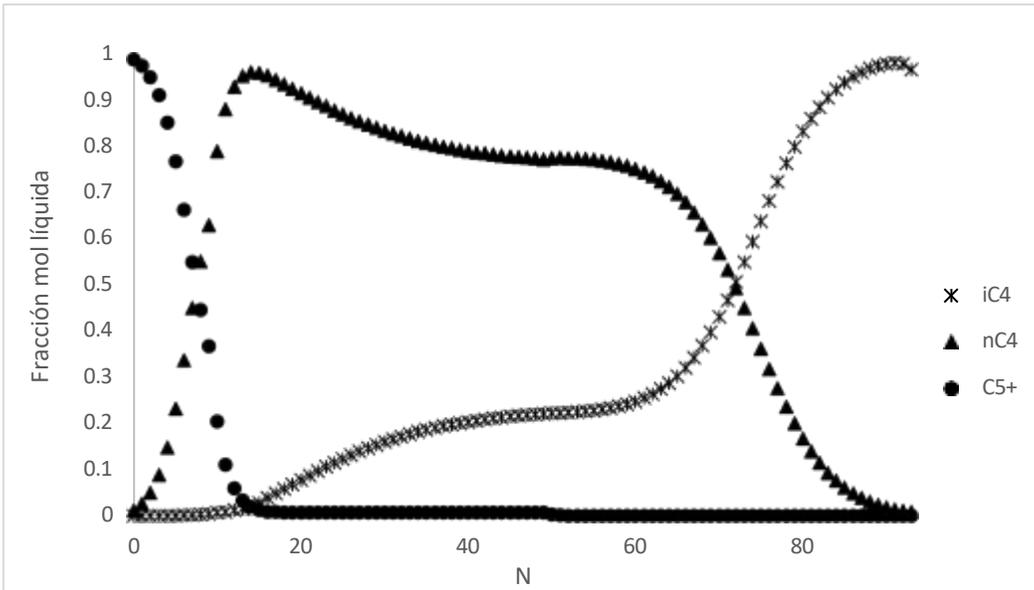


Figura 8. Perfil de composición en columna principal del sistema Convencional-DWC.

En la columna principal del sistema DWC se separan el *i*-Butano como producto de destilado, el *n*-Butano como un producto de extracción lateral, alcanzándose una composición molar de 0.9597 en la etapa 14, y los pesados (C_{5+}) se obtienen como producto de fondos de la columna. El comportamiento mostrado en la Figura 8 es común de una separación en una columna térmicamente acoplada.

3. CONCLUSIONES

Este estudio se realizó la comparación de las cargas térmicas en rehervidor y condensador para tres diferentes esquemas de destilación: Convencional, Convencional-Prefraccionador y Convencional-DWC para el fraccionamiento de GNL con la finalidad de obtener como productos el propano, *n*-butano e *i*-butano, mediante simulaciones en estado estable en UniSim Design. Asimismo se llevó a cabo la variación del flujo de alimentación con la finalidad de observar el efecto sobre las cargas térmicas; el ahorro de energía se mantiene constante al aumentar y disminuir 20% el flujo de alimentación, es decir, que el efecto es constante. En los perfiles tanto de composición como de temperatura no se observaron cambios al llevar a cabo la variación en el flujo de alimentación. Se observó que los ahorros entre los esquemas Convencional-Prefraccionador y Convencional-DWC son semejantes, pero este último representa una ventaja en cuanto a costos tanto operativos como de inversión. Los sistemas de destilación térmicamente acoplados son sistemas intensificados que impactan positivamente en los ahorros energéticos y en los costos de separación, lo que hacen que esta operación unitaria genere procesos sustentables y con menor impacto ambiental, disminuyendo la huella de carbono.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor de este trabajo, José Iván Mejía-Juárez agradece la beca económica brindada por la Universidad Autónoma de Tlaxcala, a través de la Secretaría de Investigación, como asistente de la investigadora Elsa Hynmar Fernández Martínez, misma que se encuentra en el Sistema Nacional de Investigadores del CONACYT, y agradecerle por la dirección y asesoramiento para desarrollar este trabajo de investigación. Asimismo agradecer al Dr. Brian Manuel González Contreras por su colaboración en la revisión de este artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Long, N. V. D., Lee, M., (2012) Improvement of natural gas liquid recovery energy efficiency through thermally coupled distillation arrangements. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 7, 1-7. DOI:10.1002/APJ.643
- Khaled, M. E., Mohamed, A. T., Ali, I. S., Ahamed, A. H., (2018) Simulation of Liquefied Petroleum Gas (LPG) Production from Natural Gas Using Fraction Towers. *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, 6, 148-153. DOI:10.26808/rs.st.i7v6.16
- Rahimi, A. N., Mustafa, M. F., Zaine, M. Z., Ibrahim, N., Ibrahim, K. A., Yusoff, N., Al-Mutairi, E. M., Abd.Hamid, M.K., (2015) Energy Efficiency Improvement in the Natural Gas Liquids Fractionation Unit. *Chemical Engineering Transactions*, 45, 1873-1878. DOI:10.3303/CET1545313
- Seihoub, Z. F., Hassiba, B., Weifeng, S., Vincent, G., (2017) An Improvement Shortcut Design Method of Divided Wall Columns Exemplified by a Liquefied Petroleum Gas Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56, 9710-9720. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b02125
- Silveira, A. J., (2021). Gas Natural Licuado: Análisis del Mercado Mundial de GNL y Futuro del Sector. [Tesis de maestría no publicada]. Instituto Marítimo Español

CONTROL DE LA MICROESTRUCTURA DE UN COPOLÍMERO A PARTIR DE MONÓMEROS CON ALTA DIFERENCIA EN REACTIVIDAD EN PROCESO EN SOLUCIÓN. PARTE 1: MODELADO.

MICROSTRUCTURE CONTROL FOR COPOLYMERS OBTAINED FROM MONOMERS WITH HIGH DIFFERENCE IN REACTIVITY BY SOLUTION POLYMERIZATION. PART 1: MODELING.

Pedro R. García-Morán*, Enedina Flores-Tlilayatzí, Jorge Castillo-Tejas, Shirley Carro

Universidad Autónoma de Tlaxcala, Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología.

*Email: shirley.carro@uatx.mx.

Recibido: 23 de agosto de 2023

Aceptado: 11 de octubre de 2024

RESUMEN

Este trabajo busca establecer una estrategia con la finalidad de controlar la composición y microestructura de un copolímero a partir de monómeros con alta diferencia en su reactividad. El sistema de estudio fue Acrilonitrilo-Acetato de Vinilo, con reactividades de 6 y 0.02, respectivamente. Se implementó un modelo matemático para una copolimerización en solución. Se consideró un sistema semicontinuo. El modelado de copolimerización se planteó con base en algunos modelos matemáticos existentes en la literatura y se validó simulando el sistema estireno-acrilato de etilo a 60°C. Posteriormente, se simuló el sistema acrilonitrilo-acetato de vinilo a 70°C. Los resultados demuestran que, para una alimentación equimolar, cuando la síntesis se realiza por lotes los monómeros se unen formando bloques del monómero más reactivo resultando, inicialmente, más rico en el comonómero más reactivo mientras que controlando la velocidad de adición del monómero más reactivo es posible controlar la composición y la microestructura del copolímero, obteniéndose una unión alternada de los comonómeros

Palabras Clave: Composición, control, copolimerización, microestructura, modelado

ABSTRACT

This work searches to establish a strategy with the objective of controlling the composition and microstructure in a copolymerization from monomers with a high difference in reactivity. The system studied was Acrylonitrile- Vinyl Acetate, with reactivities of 6 and 0.02, respectively. A mathematical model was implemented for solution copolymerization and semicontinuous system. The modeling was performed using mathematical models existing in literature and was validated with experimental data for styrene-ethyl acrylate copolymerization at 60°C. After, the acrylonitrile-vinyl acetate system was simulated at a reaction temperature of 70°C. Results demonstrate that, for an equimolar feed, in batch reaction, blocks of the more reactive monomer are formed while controlling the addition velocity for the more reactive monomer it is possible to control the composition and microstructure in the copolymer, resulting in an alternated addition of the comonomers.

Keywords: composition, control, copolymerization, microstructure, modeling.

1. INTRODUCCIÓN

Los polímeros están presentes en la vida diaria y tienen una gran variedad de aplicaciones debido a que presentan múltiples propiedades como son: resistencia, elasticidad, dureza, elongación, entre otras. Una forma de modificar las propiedades de los materiales poliméricos es mediante la adición de alguna otra unidad monomérica mediante una síntesis conjunta, es decir, una copolimerización. De esta forma, las características del material resultante dependen tanto de la composición del copolímero (cantidades presentes de cada monómero en el material) como de su microestructura (distribución de los monómeros dentro de la cadena).

Al polimerizar dos monómeros con amplia diferencia de reactividad, por su naturaleza, tienden a formar un copolímero con estructura de bloque. Cada bloque presenta un comportamiento de acuerdo con sus propiedades monoméricas, por lo que, a nivel microscópico, el material exhibe variaciones en sus propiedades. Existen algunas técnicas de polimerización semicontinua que permiten el control de la composición (la cantidad de cada uno de los monómeros en las cadenas), sin embargo, no se ha logrado el control de la microestructura (la forma en cómo están distribuidas las unidades monoméricas).

Arzamendi y Asua (1998) desarrollaron, mediante simulación matemática, las políticas de adición de monómeros para controlar la composición del copolímero resultante. Consideraron tres políticas de adición; en la primera ambos monómeros se agregan en condiciones ávidas; para la segunda el reactor se carga con todo el monómero menos reactivo más una cantidad suficiente del monómero más reactivo para formar, inicialmente, el copolímero con la composición deseada y, posteriormente, la adición del monómero más reactivo se lleva a cabo a un caudal de alimentación controlado que asegure un copolímero de composición constante. En la tercera política se estableció la misma alimentación que en la segunda política con la adición posterior del monómero a una velocidad de alimentación constante. La composición de copolímero obtenida en condiciones ávidas fue casi constante en los casos en que se usaron bajas velocidades de alimentación; este enfoque condujo a un tiempo de proceso mucho más alto que el proceso semiávido con tasas de adición variables. Cuando se permiten desviaciones de la composición de copolímero deseado, el proceso semiávido con una velocidad de adición constante del monómero más reactivo podría ser una buena alternativa al proceso con tasas de alimentación variable, debido a los tiempos de proceso más cortos y la ventaja de trabajar con una velocidad de alimentación constante.

En este trabajo se propone la síntesis en solución de un copolímero con microestructura cercana a la alternante a partir de monómeros con amplia diferencia en su reactividad (acrilonitrilo, AN, (N_A) y acetato de vinilo, VAc, (N_B), con una reactividad de $r_A=6.0$ y $r_B=0.02$, respectivamente) controlando la velocidad de adición de los materiales, limitando la alimentación el monómero más reactivo, con base en el modelo mencionado en el párrafo anterior.

2. MODELADO

Para mantener la composición del sistema deseada se sigue una política de control tomando como referencia los modelos de Arzamendi y Asua (1989) y Dube y col. (1997), manipulando los caudales de entrada del monómero. Por lo tanto, la estrategia consiste en alimentar una tasa de flujo del monómero más reactivo para asegurar que no existan cambios en la composición durante la evolución de la reacción. El monómero menos reactivo se alimenta totalmente en un inicio al reactor, y para el monómero más reactivo se varía la alimentación durante la reacción para mantener una relación molar A/B constante.

Las velocidades de polimerización o consumo de cada monómero están dadas por:

$$\frac{dN_A}{dt} = -N_A \Phi_A [R^*] + F_{Ain} \quad (1)$$

$$\frac{dN_B}{dt} = -N_B \Phi_B [R^*] \quad (2)$$

donde Φ_1 y Φ_2 son una relación entre las constantes de homo y propagación cruzadas (kp_{ii}) y las fracciones molares para el monómero 1 y 2, f_1 y f_2 , respectivamente:

$$\Phi_A = \frac{kp_{AA}kp_{BB}f_A + kp_{BA}kp_{AB}f_B}{kp_{BA}f_B + kp_{AB}f_B} \quad (3)$$

$$\Phi_B = \frac{kp_{AB}kp_{BA}f_B + kp_{BB}kp_{AB}f_B}{kp_{BA}f_B + kp_{AB}f_B} \quad (4)$$

Solo se alimenta el monómero más reactivo (N_A), por lo tanto, no hay flujo de alimentación del monómero 2.

$$F_{Bin} = (\Phi_A \Phi_B) N_{A,0} [R^*] \exp(-\Phi_B [R^*] t) \quad (5)$$

El volumen está en función de la densidad de los monómeros y del polímero, ρ_i y ρ_p , respectivamente; balance de radicales (R^*), los moles de los monómeros, N_i , y el flujo de entrada del monómero más reactivo.

$$\frac{dV}{dt} = F_{Ain} + \frac{N_A}{\rho_A} \frac{dN_A}{dt} + \frac{N_B}{\rho_B} \frac{dN_B}{dt} - \frac{N_p}{\rho_p} \frac{dN_p}{dt} \quad (6)$$

La composición molar acumulada se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{M}_A = \frac{\varepsilon}{(1 + \varepsilon)} \quad (7)$$

$$\bar{M}_B = 1 - \bar{M}_A \quad (8)$$

donde ε epsilon se define como:

$$\varepsilon = (f_{A,0} - f_A(1 - x_A)) / (f_A(1 - x_A) + x_A - f_{A,0}) \quad (9)$$

y x_A , la conversión para el monómero uno, como:

$$x_A = 1 - \frac{M}{M_0} = 1 - \frac{M_F}{M_0} \frac{f_A}{f_{A,0}} \frac{f_A}{f_{B,0}} \frac{f_A}{f_A - \delta} \frac{C_{A,0} - \delta_E}{C_{A,0} - \delta_E} \frac{Q}{R} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{r_B}{(1 - r_B)} \quad (11)$$

$$(12)$$

$$\beta = \frac{r_A}{(1 - r_A)}$$

$$\delta = \frac{1 - r_B}{2 - r_A - r_B} \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{(1 - r_A r_B)}{(1 - r_A)(1 - r_B)} \quad (14)$$

donde f_i y $f_{i,0}$ son las composiciones molares instantáneas a tiempo t e inicial, respectivamente.

El cálculo de la longitud de las secuencias, es decir el número de unidades de monómero del mismo tipo adicionadas a la cadena antes de que sea interrumpida por la adición de una unidad de monómero de otro tipo, se calcula como:

$$P_{AA} = \frac{r_A M_A}{r_A M_A + M_B} \quad (15)$$

$$P_{AB} = \frac{M_B}{r_A M_A + M_B} \quad (16)$$

$$P_{BA} = \frac{M_A}{r_B M_B + M_A} \quad (17)$$

$$P_{BB} = \frac{r_B M_B}{r_B M_B + M_A} \quad (18)$$

$$(N_A)_x = (P_{AA})^{(x-1)} P_{AB} \quad (19)$$

$$(N_B)_x = (P_{BB})^{(x-1)} P_{BA} \quad (20)$$

donde P_{yy} , para $y = A$ ó B , es la probabilidad de que una unidad tipo y se adicione a otra del mismo tipo (y con mismo valor) o a otra de tipo diferente (y valor distinto) y, x es el número de unidades a adicionarse (longitud de secuencia). En la Tabla 1 se resumen los valores de los parámetros empleados.

Tabla 1. Parámetros empleador para el modelo de copolimerización implementado. T en K. Dorschner(2010).

Material	K_t L/mol/min	K_p L/mol/min	MW g/mol	ρ kg/L
Acetato de Vinilo	$2.5 \times 10^{12} \cdot \exp(-3996/(R \cdot T))$	$7.8 \times 10^{10} \cdot \exp(-8403.5/RT)$	86.09	$0.9574 - 0.00127(T - 273.15)$
Acrylonitrilo	$2.5 \times 10^{12} \cdot \exp(-3996/(R \cdot T))$	$6.9 \times 10^9 \cdot \exp(-7105.3/(R \cdot T))$	53.06	$1.175 - (0.0013(T - 273.15))$

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para validar el modelo empleado se realizó una simulación del sistema estireno (M_A)-acrilato de etilo (M_B) a 60°C , valores de reactividad $r_A=0.781$ y $r_B=0.178$ con $[\text{AIBN}]_0=0.05$ mol/L como iniciador, y se compararon resultados con los obtenidos experimentalmente por McManus y Penlidis (1996). Los parámetros cinéticos se tomaron de Dorschner(2010). En la Figura 1 se muestra una gráfica de conversión contra tiempo, los resultados experimentales de literatura en líneas cortas y los del modelo implementado en línea continua. Obsérvese que la corrida experimental alcanza una conversión cercana al 100% en menor tiempo, asimismo a los 300 minutos, aproximadamente se observa una aceleración en la velocidad de reacción, manifestada por un aumento súbito de la conversión, mientras que el modelo propuesto describe una parábola, sin este fenómeno, alcanzando un 95% de conversión con un mayor tiempo de reacción.

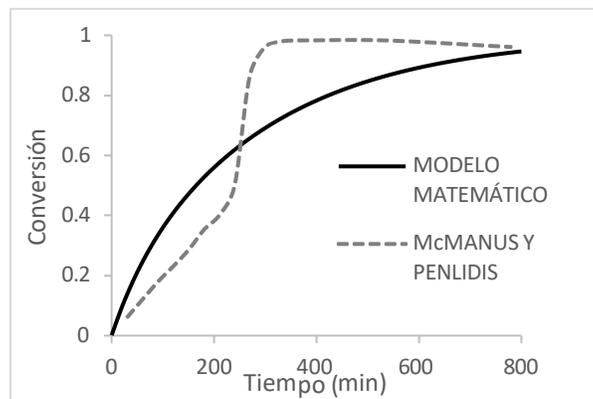


Figura 1. Comparación de datos experimentales para un sistema en solución (McManus y Penlidis,1996) contra los datos obtenidos por el modelo matemático implementado en este trabajo.

El modelo predice una evolución más lenta debido a una serie de simplificaciones, siendo la principal el considerar una forma de cálculo muy simple para la constante de terminación. Sin embargo, para los fines de este trabajo, el modelo sobre simplificado planteado en este trabajo puede considerarse útil para el cálculo de composición instantánea, acumulada y longitud de secuencias, parámetros importantes para esta investigación.

Una vez validado el modelo se procedió a simular el sistema en estudio: acrilonitrilo (M_A)-acetato de vinilo (M_B), con valores de reactividad $r_A=6$ y $r_B=0.02$, respectivamente, y como iniciador $[\text{AIBN}]_0=0.05$ mol/L. Se probaron diferentes temperaturas, pero los resultados del modelo arrojaron que a menor temperatura el porcentaje de conversión era bajo, aún en un largo periodo de tiempo; por ejemplo, a 60°C con un tiempo de 1440 min se alcanza aproximadamente un 20%; mientras que a 70°C para el mismo tiempo de reacción se alcanza un 40% de conversión, por lo que finalmente se decidió modelar a una temperatura de 70°C , para aumentar la conversión. El sistema se simuló a tres diferentes fracciones de alimentación para una polimerización batch ($f_{A,0}=0.05$, $f_{A,0}=0.95$ y $f_{A,0}=0.5$).

Para la alimentación equimolar de acrilonitrilo y acetato de vinilo se observa que el consumo del acrilonitrilo (M_A) es más rápido, por lo tanto, su fracción molar en la mezcla de monómeros (f_A) disminuye, dando paso al aumento de la fracción molar del acetato de vinilo (f_B) (Figura 2a). Al inicio de la reacción el copolímero es rico en acrilonitrilo, como lo muestra la fracción molar del

acrilonitrilo en la composición instantánea (F_A), conforme se consume el monómero la fracción disminuye, lo mismo sucede para la fracción molar acumulada del acrilonitrilo (\bar{H}_A) la cual es alta al inicio y comienza a descender con el paso del tiempo. En la Figura 2b se observa que a conversiones elevadas la longitud de los bloques de acrilonitrilo disminuyen y se forma secuencias de menos de dos unidades, debido a que se ha consumido la mayor parte de este monómero, mientras que para el acetato de vinilo se vuelve más probable encontrar secuencias en el copolímero de bloques.

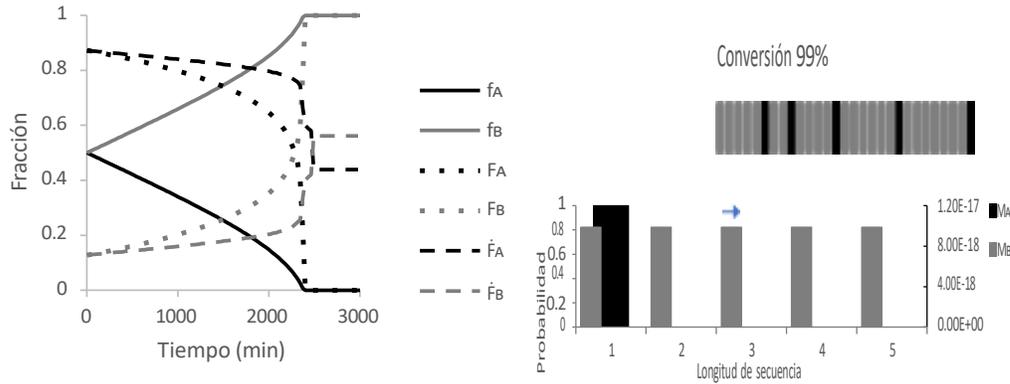


Figura 2. Polimerización por lotes a) Fracciones molares (f_A - f_B), composición instantánea (F_A - F_B) y composición acumulada (\bar{F}_A y \bar{F}_B) del sistema acrilonitrilo-acetato de vinilo, $f_{A,0}=0.5$, a 70 °C. b) Probabilidad de longitud de secuencia y estructura aproximada para $f_{A,0}=f_{B,0}$ al 99 % de conversión

Con ayuda del modelo se calculó para la mezcla de monómeros la fracción molar para el acrilonitrilo que resultara en una composición equimolar para el copolímero. Para la alimentación de AN se obtuvo un flujo inicial de 0.252 $\mu\text{l}/\text{min}$ y como flujo final 0.216 $\mu\text{l}/\text{min}$, por cada gramo de mezcla de reacción. Al mantener constante la fracción molar de acrilonitrilo en la mezcla de monómeros, $f_A=0.054$, se asegura que tanto las composiciones instantáneas (F_A y F_B) como acumuladas (\bar{H}_A y \bar{H}_B) en el copolímero se mantengan constantes y equimolares durante toda la reacción (Figura 3 a). Esto da como resultado probabilidades similares para el acrilonitrilo (M_A) y acetato de vinilo (M_B) para las secuencias de diferentes longitudes (1-5) (Figura 3 b). El valor de probabilidad mayor lo obtienen las secuencias de longitud uno (cerca del 70%) y la máxima longitud que presenta valores de probabilidad significativos es de cinco unidades. Estos resultados se observan durante toda la reacción, los mismos resultados a diferentes conversiones, e implican que, preferentemente, las unidades monoméricas reaccionaran obteniéndose un copolímero con una secuencia cercana a la alternada, con una estructura aproximada a la que se esquematiza en la figura.

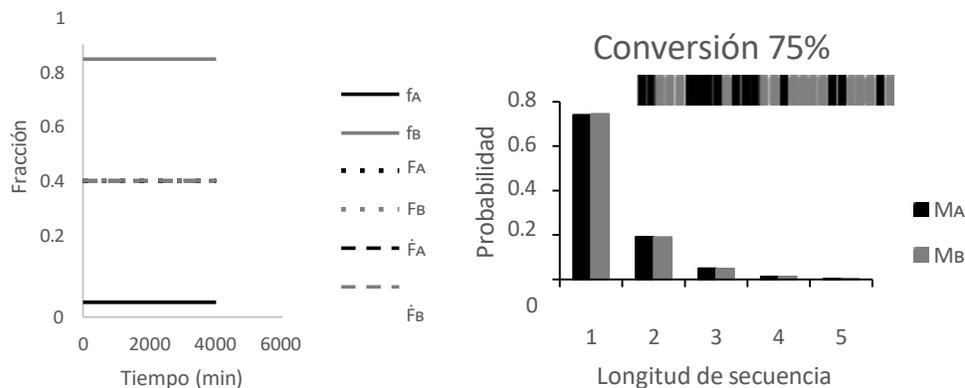


Figura 3. Polimerización en semicontinuo. a) Fracciones molares (f_A - f_B), composición instantánea (F_A - F_B) y composición acumulada (\bar{F}_A y \bar{F}_B) del sistema acrilonitrilo-acetato de vinilo, $f_{A,0}=0.054$, a 70 °C. b) Probabilidad de longitud de secuencia y estructura aproximada al 75 % de conversión

Con base en los resultados anteriores, se puede concluir que la microestructura de un copolímero en sistema por lotes está en función de la reactividad y, en gran medida, de la fracción de alimentación del monómero más reactivo, generando microestructuras en bloques de dicho monómero con unidades del monómero menos reactivo insertadas entre esto, bloques o, bien, bloques de cada uno de los monómeros, iniciando con bloques del monómero más reactivo y, una vez disminuida significativamente su fracción molar en la mezcla de reacción, seguidos por bloques del menos reactivo. Con respecto a la microestructura obtenida bajo un sistema semicontinuo, controlando la relación de concentración de monómeros en la mezcla de reacción, es posible generar secuencias con longitudes semejantes para ambos monómeros, obteniéndose microestructuras cercanas a la alternadas, debido a que el flujo de alimentación del monómero más reactivo permite mantener la composición constante. De esta manera con un sistema semicontinuo es posible controlar la composición y, por lo tanto, la estructura del copolímero .

3. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se logró modelar la obtención de un copolímero con microestructura alternada para un par de monómeros con amplia diferencia en reactividad, acrilonitrilo (AN) y acetato de vinilo (VAc) mediante el control de la adición del monómero más reactivo, AN, a la mezcla de reacción. Para determinar el perfil de flujo de AN que permitiera obtener una estructura alternada se implementó un modelo matemático para la copolimerización en semicontinuo, en el cual la principal condición es que las fracciones mol en la mezcla de monómeros y la composición del copolímero permanezcan constantes a lo largo del tiempo. Se calculó para la mezcla de monómeros una fracción molar para el acrilonitrilo de 0.054, resultando una composición equimolar para el copolímero. Para la alimentación de AN se obtuvo un flujo inicial de 0.252 $\mu\text{l}/\text{min}$ y como flujo final 0.216 $\mu\text{l}/\text{min}$, por cada gramo de mezcla de reacción.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Arzamendi, G.; Asua, J. M. (1989) Monomer Addition Policies for Copolymer Composition Control in Semicontinuous Emulsion Copolymerization. *Journal of Applied Polymer Science*, 38 (11): 2019-2036.
- Dubé, M. A.; Soares, J.B.P. Penlidis, A, Hamielec, A. (1997) Mathematical Modeling of Multicomponent Chain-Growth Polymerizations in Batch, Semibatch, and Continuous Reactors: A Review. *Ind. Eng. Chem.*, 36 (4): 966-1015.
- Dorschner, D. (2010). Multicomponent Free Radical Polymerization Model Refinements and Extensions with depropagation [Tesis de maestría, Universidad de Waterloo].R UWSpace. <http://hdl.handle.net/10012/5540>.
- McManus N. T.; Penlidis, A. (1996), A Kinetic Investigation of Styrene/Ethyl Acrylate Copolymerization, *Journal of Polymer Science: Part A Polymer Chemistry*, 34 (2): 237-248.
- Renuka, K. B.; Madivanane, R. (2012) Normal coordinate analysis of poly vinyl acetate. *Engineering Science and Technology: An International Journal*, 2, 795-799.

SIMULACIÓN DINÁMICA Y DIMENSIONAMIENTO DE UNA VAPORIZACIÓN INSTANTÁNEA ADIABÁTICA UTILIZANDO UNISIM DESIGN.

DYNAMIC SIMULATION AND SIZING OF AN ADIABATIC FLASH USING UNISIM DESIGN.

Moisés Lobatón-Montiel, José Iván Mejía-Juárez, Elsa Hynmar Fernández-Martínez, Brian Manuel González-Contreras*

Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Calzada Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala, 90300, México

*Email: brianmanuel.gonzalez@uatx.mx.com

Recibido: 01 de julio de 2024

Aceptado: 15 de septiembre de 2024

RESUMEN

La vaporización instantánea tradicional, también conocida como flash, es una etapa de equilibrio simple que se utiliza para separar las fases líquida y vapor de una corriente de alimentación en un tanque separador. En este proceso, la alimentación se vaporiza parcialmente para aumentar la composición de los componentes clave ligeros y pesados. En el ámbito industrial, el flash se utiliza para establecer la condición termodinámica de la corriente de alimentación para procesos de separación como la destilación y en el acondicionamiento del petróleo, eliminando los componentes más volátiles. En este trabajo se llevó a cabo la simulación dinámica de una vaporización instantánea adiabática utilizando una estructura de control tradicional PID multilazo para controlar la composición de uno de los componentes en la corriente de alimentación, la presión y el nivel del tanque flash. Asimismo se dimensionaron las válvulas de las tres corrientes en el sistema, que forman parte de los esquemas de control. El dimensionamiento de válvulas impacta significativamente en la dinámica y desempeño del flash con la finalidad de que exista un control preciso del flujo, estabilidad en el sistema, eficiencia energética, prolongar la vida útil del equipo y una operación segura y confiable.

Palabras Clave: flash isotérmico, flash adiabático, simulación dinámica, control, dimensionamiento.

ABSTRACT

Traditional flash vaporization, also known as flash, is a simple equilibrium step used to separate the liquid and vapor phases of a feed stream in a separator tank. In this process, the feed is partially vaporized to increase the composition of the key light and heavy components. In industry, flash is used to establish the thermodynamic condition of the feed stream for separation processes such as distillation and in oil conditioning, removing the more volatile components. In this work, the dynamic simulation of an instantaneous adiabatic vaporization was carried out using a traditional multi-loop PID control structure to control the composition of one of the components in the feed stream, the pressure, and the flash tank level. The valves of the three streams in the system, which are part of the control schemes, were also sized. Valve sizing has a significant impact on the

dynamics and performance of the flash to provide accurate flow control, system stability, energy efficiency, extended equipment life and safe and reliable operation.

Keyword: isothermal flash, adiabatic flash, dynamic simulation, control, sizing.

1. INTRODUCCIÓN

La vaporización instantánea o flash es un proceso en el que un líquido se vaporiza rápidamente a una presión menor que su presión de saturación. Este proceso se utiliza comúnmente en la industria química, petroquímica y de procesos para separar mezclas de líquidos con diferentes puntos de ebullición. La simulación de una vaporización instantánea implica el modelado del equilibrio termodinámico entre el líquido y el vapor en un separador de flash. Los modelos termodinámicos se utilizan para predecir la composición y las propiedades físicas del líquido y el vapor después de la vaporización. La condición termodinámica (fracción de vapor) de una corriente de alimentación se pueden obtener por medio de un cálculo de vaporización instantánea o flash. Existen 8 tipos de flash (Henley y Seader, 1990) en función de las especificaciones de las variables, los más comunes son el isotérmico (Rachford y Rice, 1952), adiabático, no adiabático y el de fracción vaporizada. Los cálculos de una destilación flash son estudiados por los ingenieros químicos en el área de procesos de separación y aplicados en la industria, principalmente en la separación de compuestos en los procesos petroleros. De igual manera, la vaporización instantánea se encuentra dentro de los métodos de solución en los simuladores de procesos. En la Figura 1 se muestra el esquema representativo de una separación flash, en donde una corriente de alimentación calentada y presurizada se somete a una estrangulación mediante una válvula, provocando con esto que la presión de la corriente disminuya por debajo de su presión de saturación causando una vaporización súbita. Como resultado, se hacen presentes dos fases (líquido y vapor), las cuales son divididas en un separador. Por la parte de arriba se obtiene un vapor rico en el componente más volátil, mientras que en el fondo se obtiene el componente pesado con alta composición.

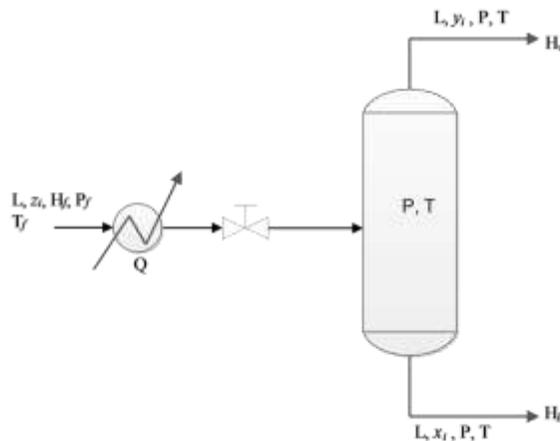


Figura 1. Esquema de una vaporización instantánea.

La simulación dinámica de la vaporización instantánea se aplica en múltiples campos, especialmente en la industria química y de procesos. Su uso se destaca por su capacidad de optimizar el rendimiento de la vaporización, reducir costos y mejorar la eficiencia energética. Adicionalmente, la simulación permite predecir con precisión la producción de vapor y la composición de la mezcla

líquida, convirtiéndose en una herramienta fundamental en el diseño y operación de procesos de separación de líquidos. Asimismo es posible realizar un análisis de desempeño, con el cual se pueden detectar problemas predictivos, de diagnóstico/solución de problemas, en sistemas de control, de eliminación de cuellos de botella, entre otros (Melo-González, 2012). El control de una vaporización instantánea implica la regulación de diversas variables como: temperatura, presión, flujo, nivel y relación líquido-vapor, cada una de ellas con diferentes objetivos que están en función de su aplicación con la finalidad de que el flash se produzca de manera eficiente y controlada. Por ejemplo, los controladores de presión se utilizan para mantener la presión en el separador de flash dentro de un rango deseado y evitar condiciones operativas inseguras; los de temperatura ayudan a garantizar la calidad del producto final; los de flujo ayudan a mantener una producción constante y reducir los costos del proceso, mientras que los de nivel previenen la formación de burbujas y garantizar la seguridad del proceso y finalmente los de relación de vapor-líquido mejoran la eficiencia energética y la calidad del producto final.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo de investigación se llevó a cabo la simulación dinámica en UniSim Design y el dimensionamiento de las válvulas de control colocadas en las tres corrientes del taque separador flash con la finalidad de controlar composición en la alimentación, presión y nivel. El caso de estudio fue tomado de Morales-Rodelo (2020), el cual es una mezcla de 4 componentes que contiene la siguiente composición molar: 0.005969 de óxido de propileno (PO), 0.9423 de agua (W), 0.0338 de propilenglicol (PG) y 0.0179 de ácido sulfúrico (SA). El equilibrio Líquido-Vapor de la mezcla se estimó con UNIQUAC con la finalidad de predecir las propiedades termodinámicas adecuadamente. La alimentación al tanque es un líquido saturado con flujo de 35.91 Kmol/h. Asimismo, se consideró el mismo dimensionamiento del tanque que en la literatura, con 0.35 m de diámetro y 1.7 m de altura con la finalidad de manejar un volumen adecuado.

Se inició con la simulación en estado estable, la cual proporciona información sobre el balance de materia y energía en el flash y es la base de la simulación dinámica. Antes de realizar dicha simulación dinámica, es necesario dimensionar las válvulas que integran el control de las variables para llevar a cabo la operación flash; en particular, el dimensionamiento de la válvula de estrangulamiento y las dos válvulas que se encuentran en la salida del tanque flash, para implementar un sistema de lazo de control eficiente. Para dimensionar adecuadamente estas válvulas, es fundamental determinar previamente el diámetro nominal de la tubería del proceso, tomando en cuenta que se manejará una alimentación de líquido saturado, mientras que en el fondo del tanque se sabe que la condición termodinámica es como líquido saturado y en el domo un vapor saturado. Independientemente de las condiciones termodinámicas de las corrientes involucradas, existen otros factores que influyen en la selección del diámetro nominal de la tubería como: el caudal o flujo de fluido, la presión diferencial entre la entrada y la salida de la válvula, velocidad del fluido dentro de la tubería, pérdidas de carga y consultar normas y estándares para garantizar una selección adecuada y segura.

En la industria, durante el proceso de selección de una válvula de control se emplean controladores de posición de la válvula, dispositivo utilizado para controlar y regular la posición del obturador de una válvula. El obturador es la parte de la válvula que regula el flujo de fluido al abrirse o cerrarse. El controlador de posición del obturador se encarga de mover y posicionar el obturador de la válvula en respuesta a señales de control, ya sea de forma manual o automática. La selección y configuración adecuada del controlador de posición del obturador depende del tipo de válvula, el sistema de

control y los requisitos específicos del proceso. La elección correcta del controlador de posición contribuye a un control eficiente y confiable del flujo en las válvulas, lo que resulta en una operación segura y óptima. El dimensionamiento de la válvula en este trabajo se realizó mediante el coeficiente de flujo (C_v), el cual implica el caudal que puede pasar a través de la válvula en función de la caída de presión a través de ella. El C_v se utiliza para caracterizar la capacidad de flujo de una válvula y se expresa en galones por minuto (GPM) y se puede calcular mediante la ecuación (1). Generalmente, el valor de C_v se determina experimentalmente y se proporciona en las especificaciones del fabricante de la válvula. Cuanto mayor sea el valor de C_v , mayor será la capacidad de flujo de la válvula. Si el C_v de la válvula es demasiado pequeño, el caudal será insuficiente y la válvula puede estar restringiendo el flujo. Por otro lado, si el C_v es demasiado grande, puede haber una caída de presión excesiva en la válvula y se pueden producir pérdidas de carga indeseables.

$$C_v = Q \sqrt{\frac{S}{\Delta P}} \quad (1)$$

donde, Q es el flujo volumétrico en GPM, S es la densidad relativa y ΔP la caída de presión en el accesorio en Psi. Considerando que la disminución de presión no solo ocurre en el componente específico en cuestión, sino también en todo el sistema, desde las entradas hasta las tuberías y accesorios, se estima una reducción de presión de 1 psi en cada una de las válvulas de control. Sin embargo, en el caso de una restricción en la válvula que cause vaporización, se utiliza una ecuación adicional para calcular el coeficiente de flujo (C_v). Para determinar el C_v en el flujo de gases y vapores a través de una válvula, se deben tener en cuenta otras características además del caudal y la disminución de presión (como se muestra en la ecuación (2)). En este escenario, el valor de C_v de la válvula de alineación se determina utilizando la siguiente fórmula:

$$C_v = \frac{Q}{C_f} \sqrt{\frac{S}{\Delta P}} \quad (2)$$

donde C_f es el factor de corrección para los coeficientes de flujo en válvulas de control, este tipo de factor es determinado a partir de tablas. El cálculo del coeficiente de flujo (C_v) de una válvula es importante para el dimensionamiento adecuado, el control preciso del flujo, la eficiencia energética, el rendimiento del proceso y la seguridad de la válvula. Una vez calculado el C_v , se determina un tamaño de válvula, utilizando las tablas de C_v proporcionadas por los fabricantes de válvulas. Estas tablas relacionan los valores de C_v con los tamaños nominales de las válvulas. Es fundamental considerar que el tamaño nominal de la válvula puede diferir según el estándar aplicado en la región o la industria. Al elegir una válvula, resulta esencial comprobar la compatibilidad del tamaño con los demás elementos del sistema, como las tuberías y los accesorios.

En la simulación dinámica del flash se llevaron a cabo perturbaciones del tipo escalón en la temperatura de alimentación, de 110°C a 120°C, con la finalidad de observar la respuesta en la composición de alimentación para el Propilenglicol, la presión y el nivel de líquido en el tanque y así observar la forma en la que se comporta el controlador en cada caso de estudio.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para el diámetro nominal de tubería y el tamaño de válvula calculados a partir de la especificaciones de flujo y presión a través de la tubería y de la válvula para cada una de las corrientes involucradas en el flash.

Tabla 1. Resultados del dimensionamiento de las válvulas.

Corriente	D tub [in]	ρ [lb/ft ³]	ρ_{rel}	Q [GPM]	ΔP	Cv [GPM]	Diámetro nominal de la válvula [in]
F	3	24.1693	0.38792	3.30	1	3.6800	0.75
Vo	3	0.0479	0.00077	0.02	1	0.0008	0.25
Lo	3	62.3716	1.00107	3.22	1	3.1700	0.75

El diámetro nominal para tuberías del sistema se considera igual para todo el proceso y las condiciones térmicas de las corrientes en el flash son un vapor y líquido saturado.

En la Figura 2 se muestra la configuración de un flash dinámico generado en el simulador de procesos UniSim Design. El esquema de control aplicado al caso de estudio fue el Proporcional-Integral-Derivativo (PID), aunque el término derivativo no contribuye debido a que el sistema muestra una respuesta rápida.

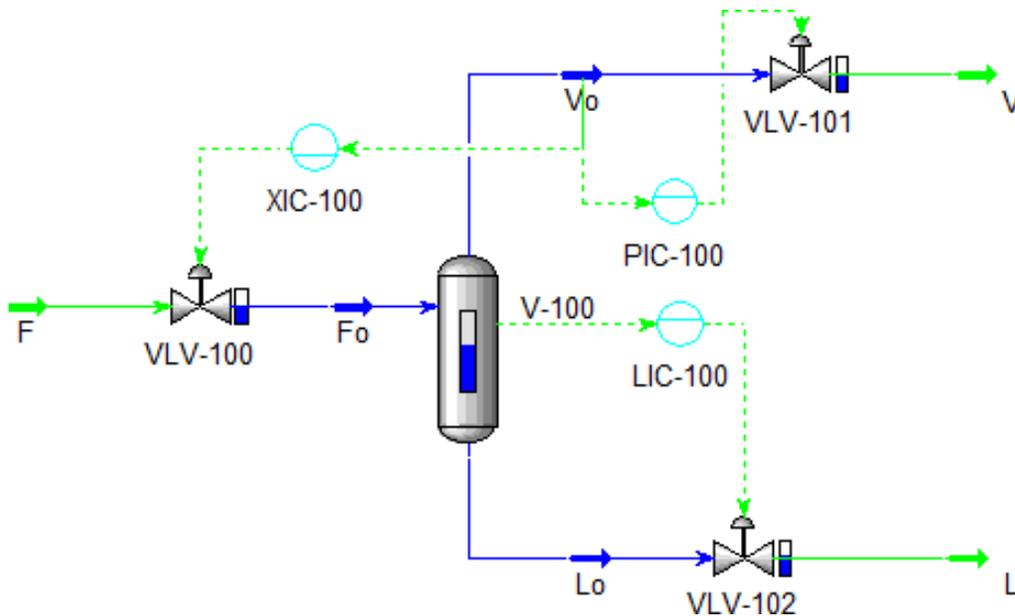


Figura 2. Simulación dinámica de la vaporización instantánea adiabática.

El flash cuenta con tres controladores, uno para la concentración de Propilenglicol en la alimentación (XIC-100), el segundo para mantener el control de la presión en la corriente de vapor (PIC-100) y finalmente el control en el nivel del líquido en el tanque separador (LIC-100).

En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la presión, donde la línea discontinua guión-punto representa la apertura de la válvula (OP), la línea discontinua registra el valor actual de la presión (PV) y la línea continua es el set point de la presión del tanque (SP). Cuando se lleva a cabo la perturbación, se observa que la presión se estabiliza alrededor de 5 segundos, debido a que la perturbación que se efectuó fue del tipo escalón, hay un cambio en el valor de la presión, diferente al set point original, por lo que éste último debería modificarse, pero para efectos ilustrativos se matuvo en su valor original.

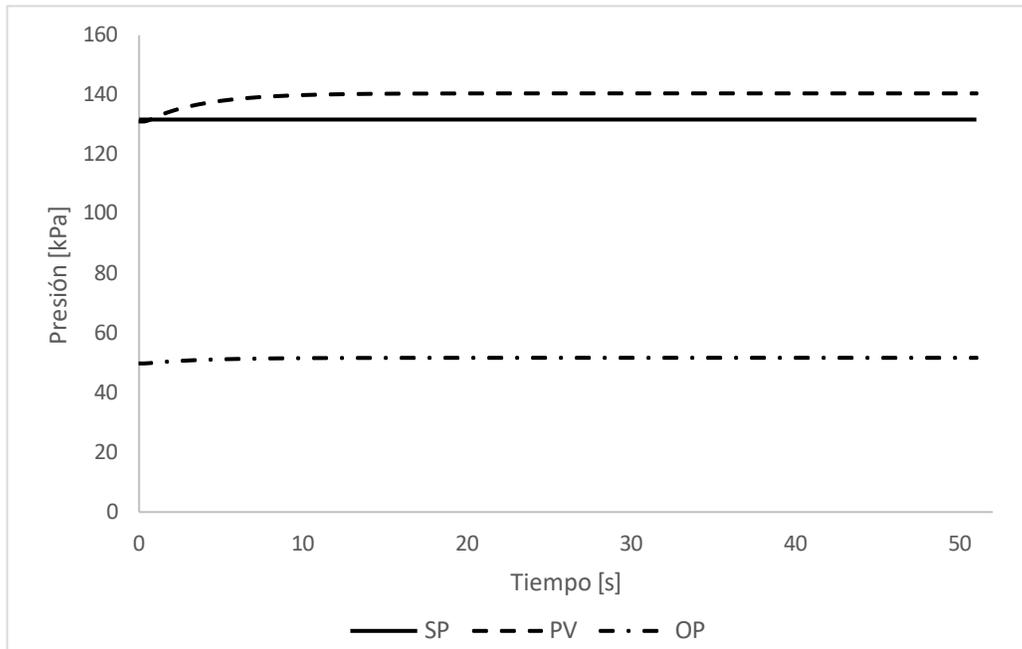


Figura 3. Gráfico de respuesta a la perturbación en el control de presión del tanque

De la misma manera que en el controlador de presión, en el controlador de nivel del líquido (Figura 4) del tanque, la línea discontinua guión-punto representa la apertura de la válvula (OP), la línea discontinua muestra el valor actual del nivel (PV) y la línea continua es el set point del nivel del líquido en el tanque (SP). Como puede observarse al nivel del tanque le toma estabilizarse por arriba de los 50 segundos; la perturbación se hizo en la temperatura de alimentación de igual forma que para la presión del tanque separador; y por el comportamiento mostrado del porcentaje en el nivel del líquido en el tanque, este cambio impacta significativamente, aunque el control responde adecuadamente.

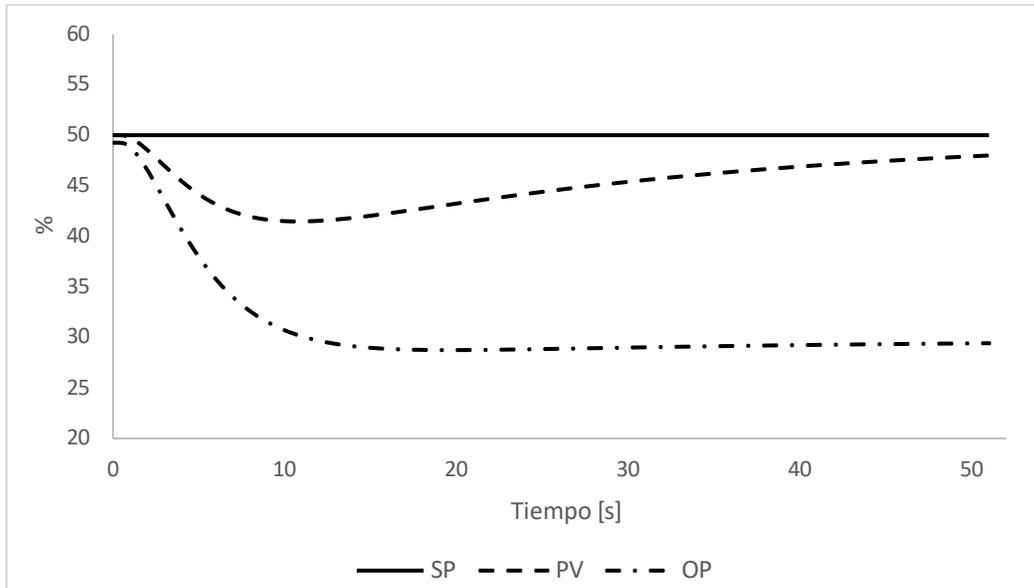


Figura 4. Gráfico de respuesta a la perturbación en el control de nivel

El objetivo de XIC-100 es minimizar la composición de Propilenglicol en la corriente de vapor, la línea discontinua representa la fracción molar actual de Propilenglicol (PV) y la línea continua es el set point (SP). Se observa que no existen cambios en la composición del Propilenglicol, pero al igual que en las otras dos variables a controlar, la perturbación en la alimentación, modifica la variable de proceso con respecto al set point y esto es lógico.

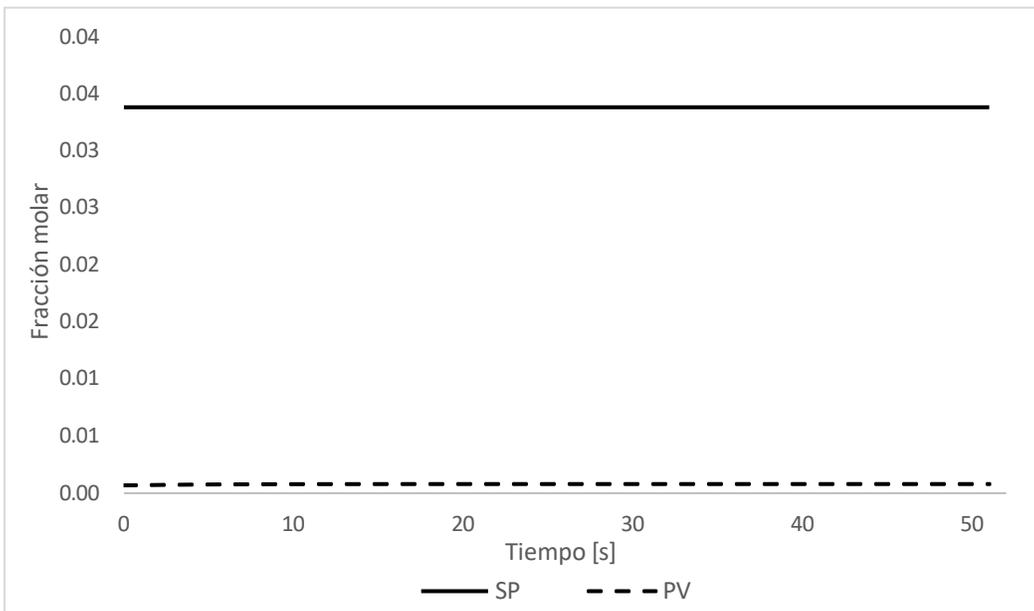


Figura 5. Gráfico de respuesta a la perturbación en el control de nivel.

3. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se llevó a cabo la simulación dinámica y el dimensionamiento de las válvulas de control de un flash adiabático con la finalidad de llevar a cabo un análisis de desempeño en el control de la composición de Propilenglicol en la alimentación, en la presión del tanque y en

el nivel del líquido, provocado por perturbaciones en la temperatura de alimentación (de 110°C a 120°C). Se observó que en el nivel del tanque es donde se presentan cambios más significativos, seguidos por los cambios en la presión y no se registraron cambios en la composición del Propilenglicol. Mencionar que la estabilidad en el nivel del líquido y en la presión del tanque es rápida, lo que infiere que el esquema de control aplicado es adecuado. Se emplearán otras estrategias de control con la finalidad de llevar a cabo metodologías en la detección y diagnóstico de fallas que se puedan presentar en el flash. El diseño de las válvulas en la simulación dinámica de cualquier sistema de procesos, que para este estudio se considero el flash, es relevante en diversos factores como el control de flujo adecuado, mejorar la eficiencia energética, garantizar la seguridad operativa, proteger el equipo y cumplir con los estándares normativos. Un enfoque cuidadoso y técnico en el dimensionamiento de las válvulas es fundamental para el éxito y la eficacia de los procesos industriales.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor de este trabajo, Moisés Lobatón-Montiel agradece la beca económica brindada por la Universidad Autónoma de Tlaxcala, a través del la Secretaría de Investigación, como asistente del investigador Brian Manuel González Contreras, mismo que se encuentra en el Sistema Nacional de Investigadores del CONACyT, y agradecerle por la dirección y asesoramiento para desarrollar este trabajo de investigación. Asimismo agradecer a la Dra. Elsa Hynmar Fernández Martínez por su colaboración en el desarrollo y la revisión de este artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Henley, E. J., Seader, J. D., (1981). Equilibrium-Stage Separation Operations in Chemical Engineering, EUA. John Wiley & Sons.

Melo-González, R., López-Sánchez, C., Camacho-Gamboa, C.; Esparza-Lagunes, A.; Villa Domínguez, R. (2012). Simulación dinámica de sistemas, una herramienta para el análisis del desempeño de sistemas y procesos en la industria petrolera: Metodología y resultados. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 27 (1), 49-62, recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48224413007>.

Morales-Rodelo, K., Álvarez, H. D., (2020). Determination and use of feasible operation region in flash distillation control, *Revista Facultad de Ingeniería*, Universidad de Antioquia, 95, 53-63. doi.org/10.17533/.

Rachford, H. H.; Rice, J. D., (1952). "Procedure for use of Electronic Digital Computers in Calculating Flash Vaporization Hydrocarbon Equilibrium", *Petroleum Transactions AIME*, 195, 327-328, recuperado de <http://www.ipt.ntnu.no/~curtis/courses/PVT-Flow/2018-TPG4145/Handouts/SPE952327-Flash-Rachford-Rice.pdf>.

Walas, S. M., (1988). *Chemical Process Equipment Selection and Design*. USA. Butterworth-Heineman.

CONTROL DE LA MICROESTRUCTURA DE UN COPOLÍMERO A PARTIR DE MONÓMEROS CON ALTA DIFERENCIA EN REACTIVIDAD EN PROCESO EN SOLUCIÓN. PARTE II: RESULTADOS EXPERIMENTALES.

MICROSTRUCTURE CONTROL FOR COPOLYMERS OBTAINED FROM MONOMERS WITH HIGH DIFFERENCE IN REACTIVITY BY SOLUTION POLYMERIZATION. PART II: EXPERIMENTAL RESULTS

Shirley Carro¹, Enedina Flores-Tlilayatzí¹, Yolanda del Ángel Vargas², Friné López-Medina¹, Pedro R. García-Morán*¹.

¹Universidad Autónoma de Tlaxcala, Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología.

² Universidad Politécnica de Tlaxcala.

*Email: pedroraymundo.garcía@uatx.mx.

Recibido: 23 de agosto de 2024

Aceptado: 17 de noviembre de 2024

RESUMEN

Este proyecto busca establecer una estrategia con la finalidad de controlar la composición y microestructura de un copolímero a partir de monómeros con alta diferencia en su reactividad. El sistema de estudio fue Acrilonitrilo-Acetato de Vinilo, con reactividades de 6 y 0.02, respectivamente. En la primera parte se indicaron los cálculos para el flujo de alimentación mediante un modelo matemático tomado de literatura, mientras que en la segunda se muestran los resultados experimentales. La síntesis del copolímero se realizó en un proceso en solución, tanto por lotes como en semicontinuo, con la finalidad de comparar las características de los materiales obtenidos. En el proceso en semicontinuo se dosificó el monómero más reactivo para limitar su concentración a un nivel adecuado. Se probaron dos disolventes, dimetilformamida y dimetilsulfóxido, encontrando resultados satisfactorios con el primero de ellos. La determinación de la composición se llevó a cabo mediante espectroscopía infrarroja. También se determinó la temperatura de transición vítrea mediante calorimetría diferencial de barrido. Se encontró que para el sistema por lotes el porcentaje de acrilonitrilo en el copolímero fue siempre mayor a la relación de alimentación mientras que para el sistema en semicontinuo se mantuvo constante durante toda la reacción.

Palabras Clave: Composición, control, copolimerización, microestructura

ABSTRACT

This work intends to establish a policy in order to control the composition and microstructure in a copolymer obtained from monomers with high difference in reactivity. The system studied was Acrylonitrile- Vinyl acetate, with reactivities of 6 and 0.02, respectively. In the first part it was calculated, by a mathematical model taken from literature, the feed flow. In this second part the experimental results are shown. The copolymer synthesis was performed in a solution polymerization, in batch and semicontinuous process, in order to compare the microstructure results. In semicontinuous process the more reactive monomer was dosed in order to control its concentration in the polymerization medium. Two different solvents were used, dimethyl formamide and dimethyl sulfoxide; better results were found with the former. Copolymer composition was determined by infrared spectroscopy. Also, the glass transition temperature was

determined by differential scanning calorimetry. It was found than in batch system the acrylonitrile percentage in copolymer was always bigger in comparison with the molar relation for feed, while for semicontinuous system the composition in copolymer maintains constant.

Keywords: Composition, control, copolymerization, microstructure.

1. INTRODUCCIÓN

Los polímeros están presentes en la vida diaria y tienen una gran variedad de aplicaciones debido a que presentan múltiples propiedades como son: resistencia, elasticidad, dureza, elongación, entre otras. Una forma de modificar las propiedades de los materiales poliméricos es mediante la adición de alguna otra unidad monomérica mediante una síntesis conjunta, es decir, una copolimerización. De esta forma, las características del material resultante dependen tanto de la composición del copolímero (cantidades presentes de cada monómero en el material) como de su microestructura (distribución de los monómeros dentro de la cadena).

La posibilidad de controlar secuencias de monómeros en macromoléculas sintéticas tiene muchas implicaciones científicas y tecnológicas. Se han identificado varios métodos sintéticos para controlar secuencias de monómeros en polímeros, y han surgido dos tendencias principales en el campo de polímeros con secuencias controladas.

Algunos enfoques usan conceptos biológicos que han sido optimizados por naturaleza para la regulación de secuencias. Por ejemplo, pueden emplearse plantillas de ADN, enzimas o incluso organismos vivos para preparar polímeros con una secuencia determinada. Estos mecanismos naturales se pueden adaptar para tolerar monómeros no naturales. La otra tendencia es la preparación de polímeros con secuencia controlada mediante química sintética (Lutz y col., 2013). Otras alternativas para lograr el control de la estructura utilizan polimerización por radicales libres utilizando agentes RAFT (Rivera y col., 2005) y poli adición de radicales con crecimiento gradual, utilizando un catalizador monómero metal (Sato y col., 2010). Sin embargo, emplean técnicas costosas y particulares para cada sistema. Por otra parte, Arzamendi y Asua (1998) desarrollaron, mediante simulación matemática, las políticas de adición de monómeros para controlar la composición del copolímero resultante, no así la microestructura del material.

Al polimerizar dos monómeros con amplia diferencia de reactividad, por su naturaleza, tienden a formar un copolímero con estructura de bloque. Cada bloque presenta un comportamiento de acuerdo con sus propiedades monoméricas, por lo que, a nivel microscópico, el material exhibe variaciones en sus propiedades. Existen algunas técnicas de polimerización semicontinua que permiten el control de la composición (la cantidad de cada uno de los monómeros en las cadenas), sin embargo, no se ha logrado el control de la microestructura (la forma en cómo están distribuidas las unidades monoméricas).

En este trabajo se propone la síntesis en solución de un copolímero con microestructura cercana a la alternante a partir de monómeros con amplia diferencia en su reactividad (acrilonitrilo, AN, (N_A) y acetato de vinilo, VAc, (N_B), con una reactividad de $r_A=6.0$ y $r_B=0.02$, respectivamente) controlando la velocidad de adición de los materiales, limitando la alimentación el monómero más reactivo.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Para mantener la composición del sistema deseada se sigue una política de control tomando como referencia los modelos de Arzamendi y Asua (1989) y Dube y col. (1997), manipulando los caudales de entrada del monómero. Por lo tanto, la estrategia consiste en alimentar una tasa de flujo del monómero más reactivo para asegurar que no existan cambios en la composición durante la evolución de la reacción. El monómero menos reactivo se alimenta totalmente en un inicio al reactor, y para el monómero más reactivo se varía la alimentación durante la reacción para mantener una relación molar A/B constante. Los detalles del modelado se pueden consultar en la parte I de este trabajo.

2.1. Polimerizaciones

Las polimerizaciones se llevaron a cabo en un matraz de tres bocas de 100 ml, provisto de un agitador magnético y condensador para reflujo de volátiles. En una de las bocas se colocó una entrada de corriente de nitrógeno y en otra una manguera por la cual se alimentó el monómero. Para las copolimerizaciones en semicontinuo se alimentaron inicialmente la totalidad de VAc y una parte de AN, disueltos en solvente (Dimetil sulfoxido, DMSO, o dimetilformamida, DMFA) y se agregaron al reactor. Posteriormente, se elevó la temperatura hasta 80°C, la cual fue controlada mediante un baño de calentamiento. Se hizo pasar una corriente de nitrógeno para desplazar el oxígeno del sistema, la cual fue continua durante toda la polimerización. Una vez constante la temperatura se agregó el iniciador (AIBN), previamente disuelto en el solvente. Con ayuda de una bomba de infusión (kds scientific, modelo 200) se añadió AN con rampa de flujo de alimentación con un valor inicial de 3.71 $\mu\text{l}/\text{min}$ y como flujo final 3.19 $\mu\text{l}/\text{min}$, manteniendo agitación constante durante 5 horas.

El flujo de alimentación fue determinado con ayuda de los resultados de simulación del modelo propuesto en este trabajo (ver parte I). Varias muestras fueron tomadas a diferentes tiempos para conocer el avance de la reacción. El producto fue lavado con agua tridestilada, posteriormente se congeló a -80°C por 24 hrs, para secarlo por liofilización, registrando el peso final para obtener la conversión alcanzada.

2.2. Caracterización

Las diferentes muestras (mezclas, homopolímeros y copolímeros) se caracterizaron por espectroscopía infrarroja con reflectancia totalmente atenuada, con un equipo Termo Fisher Scientific, los datos obtenidos se analizaron con el software Origin Pro 8[®]. Con el objetivo de identificar la composición de cada muestra se generó una curva de calibración a partir de mezclas de los homopolímeros con diferente composición. Se llevaron a cabo mezclas físicas poliacrilonitrilo con poliacetato de vinilo (ambos sintetizados en polimerización en masa) empleando DMFA como disolvente. Los porcentajes en peso variaron de 10 en 10, de 0-100 % para AN. Para realizar las mezclas se pesaron los homopolímeros y ambos se agregaron un vaso de precipitados que contenía el cosolvente. Después de disolver los polímeros, se obtuvo una mezcla viscosa, la cual se vació en cajas petri para formar películas, buscando que su espesor fuera menor a 5 μm .

Las muestras tomadas a diferentes tiempos de reacción en el sistema batch (2 y 8 hrs) y semicontinuo (2,4 y 8 hrs), fueron analizadas por DSC para identificar la temperatura de transición vítrea, T_g , de los materiales. Se utilizó un calorímetro diferencial PerkinElmer, calibrado con indio, las muestras fueron calentadas en un intervalo de 10 a 100°C empleando una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuando se empleó DMSO como solvente se observó para todas las reacciones, tanto homopolimerizaciones como copolimerizaciones, que el producto obtenido presentaba una coloración café con aspecto gomoso. Inicialmente, esta coloración se atribuyó a absorción del solvente por lo que los productos se lavaron repetidamente con metanol y, posteriormente, con agua tridestilada y se liofilizaron. Después de estos lavados se observó que la coloración disminuyó ligeramente. Se esperaba que, al ser lavados y secados a vacío, el solvente se volatilizara, sin embargo, el producto permaneció con el mismo aspecto. Además, el aspecto gomoso de los polímeros no es esperado, ya que para los homopolímeros los valores de temperatura de transición vítrea son 80 y 28 °C, para el poli(acrilonitrilo), PAN, y poli (acetato de vinilo), PVAc, respectivamente, por lo que a temperatura ambiente se espera que estén rígidos. En las polimerizaciones, la rigidez de los materiales se alcanza con el aumento en el peso molecular del polímero, iniciando el sistema como líquido, con los monómeros, pasando a obtenerse aceites, ceras, gomas y, finalmente, un material sólido. Por lo tanto, el aspecto gomoso del material indica un peso molecular bajo. Una posibilidad es que el solvente pueda estar interactuando, presentándose una alta transferencia de cadena hacia éste, lo que ocasionaría una disminución en el peso molecular del polímero y, en consecuencia, el aspecto gomoso. Otra posibilidad es que el solvente se encuentre fuertemente atrapado entre el polímero, solubilizando el interior de las muestras y, por lo tanto, reblandeciéndolo. Este problema no se presentó con el solvente DMFA, por lo que solamente se presentan los resultados obtenidos cuando se empleó este último solvente.

La Figura 1 muestra algunos de los espectros FTIR de las mezclas de PAN- PVAc en por ciento peso, lo que permite obtener información, de acuerdo con la composición de la mezcla, de la intensidad de las diferentes señales características del PAN y del PVAc. El acrilonitrilo tiene señales características alrededor de los 2200,1400,1000 cm^{-1} , siendo la principal la correspondiente al grupo nitrilo a 2200 cm^{-1} . Para el VAc, las señales características se presentan en 3400,1730, 1320 y 900 cm^{-1} , donde la señal representativa se encuentra a 1730 cm^{-1} (Renuka y Medivanane, 2012). Se eligieron señales características de cada polímero ubicadas a diferentes longitudes de onda (cm^{-1}), y con base en una relación de intensidad de señales (Intensidad PAN/ Intensidad PVAc) se generó la curva de calibración para determinar la composición, graficando la relación contra la composición (D'amelia y col., 2016). Se tomaron tres pares de relaciones de intensidad (1070/1720 ,1453/1720 y 1453/931) para diferentes composiciones de las mezclas. En la Tabla 1 se resumen los resultados de los valores de cada señal, así como de dichas relaciones.

En la Figura 2 se muestra la curva de calibración obtenida con los datos de la relación (1453/ 931), los cuales tuvieron un mejor ajuste lineal ($R= 89.25$). Asimismo, en la figura se incluye la ecuación que se tomó como el modelo para predecir la composición del copolímero a partir de la intensidad de las señales ubicadas a 1453 y 931 cm^{-1} .

Tabla 1. Resultados para las relaciones de las señales características de las mezclas de homopolímeros PAN-PVAc empleadas para la obtención de la curva de calibración para cuantificar la composición de los copolímeros sintetizados.

Composición	Polímero						
	PAN			PVAc			
	Longitud de onda (cm ⁻¹)				Relación de intensidades PAN/PVAc		
% masa PAN	1070	1453	1720	931	1070/1720	1453/1720	1453/931
10	596.8	111.16	983.59	82.02	1.65	8.85	1.14
40	81.72	11.08	107.16	96.89	1.31	9.67	1.02
50	85.05	43.67	184	96.24	2.16	4.21	1.01
60	26.22	1.54	43.15	99.12	1.65	28.02	1.00
70	11.07	117.01	86.76	98.5	7.84	0.74	0.95
80	12.38	112.87	101.47	98.5	8.20	0.9	0.95
90	7.5	134.01	252.55	96.36	33.67	1.88	0.96

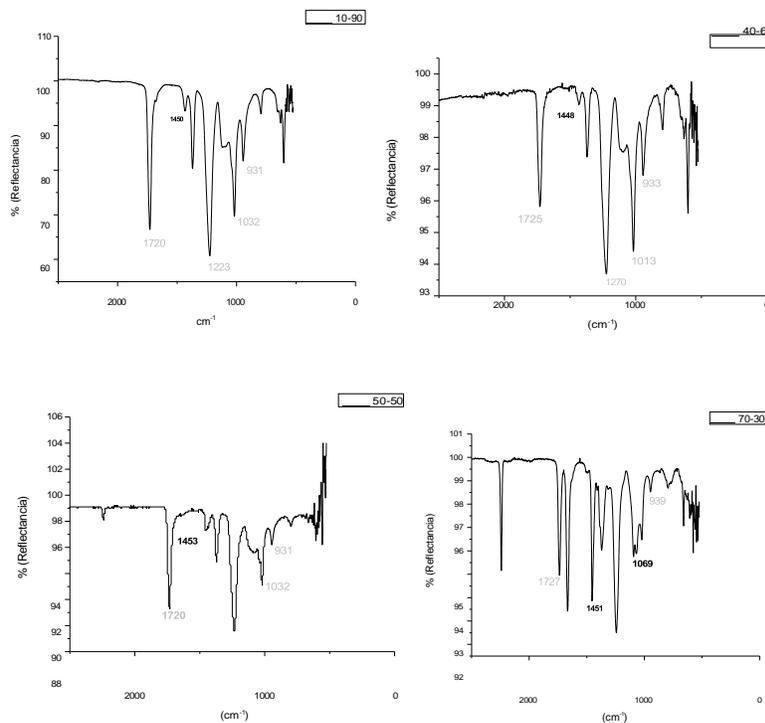


Figura 1. Espectros de infrarrojo para mezclas de poliacrilonitrilo (PAN)-poliacetato de vinilo (PVAc). La ISSN: 3061-7448

composición se indica en la figura. En gris las señales características correspondiente al PVAc y en negro las correspondientes al PAN.

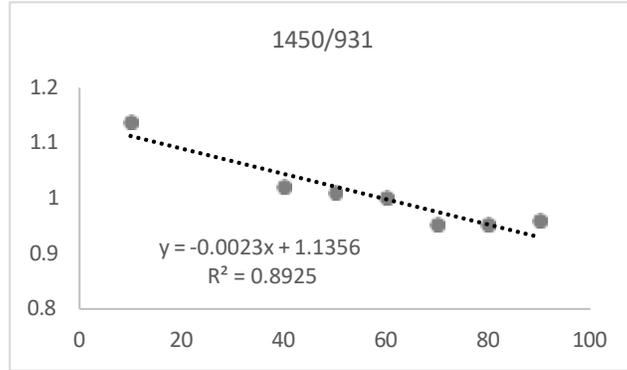


Figura 2. Curva de calibración empleada para la cuantificación de la cantidad de comonómeros para los copolímeros sintetizados

En la Figura 3 se muestran los espectros de ATR-IR para muestras de la copolimerización en semicontinuo y por lotes, tomadas cada dos horas durante la reacción. Para todas las muestras se se aprecian claramente las señales características que indican la presencia del AN (en negritas) y del VAc (en gris). Nótese que, en el caso de la copolimerización en semicontinuo, no existe diferencia significativa en los espectros, indicando que la composición no varía. La conversión máxima alcanzada fue del 64 %. Para el sistema por lotes, obsérvese que conforme aumenta el tiempo de reacción la intensidad de la señal de referencia correspondiente al VAc disminuye (930 cm^{-1}). Estos resultados son contrarios a los esperados, de acuerdo con los resultados de las simulaciones realizadas, ya que conforme el tiempo transcurre la concentración de VAc en el copolímero debería aumentar, debido a que la fracción molar de AN en la mezcla de monómeros disminuye. Es probable que esto no se observe debido a que la conversión alcanzada (47%) no sea lo suficientemente alta como para apreciar tal fenómeno.

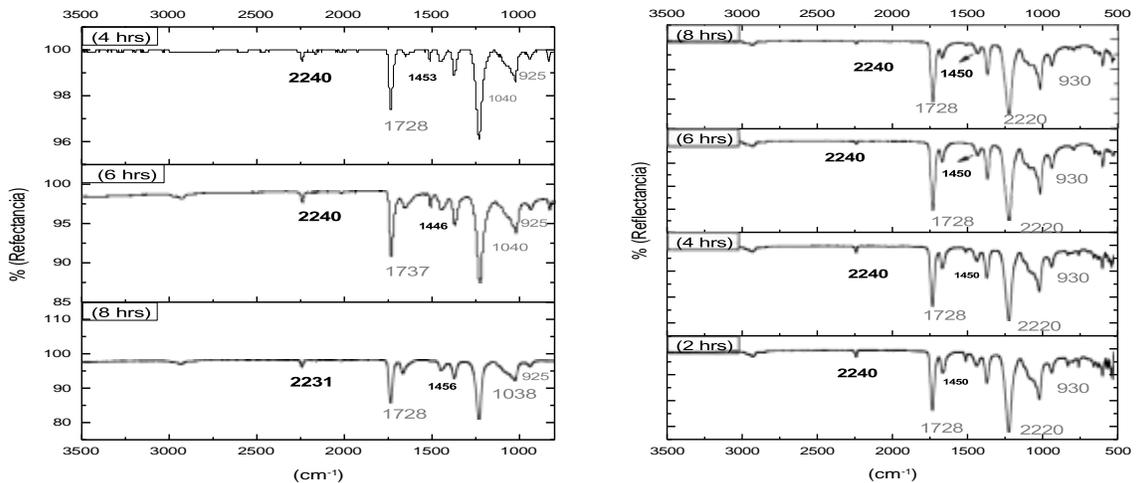


Figura 3. Espectros de infrarrojo para muestras tomadas a diferente tiempo para los copolímeros sintetizados por lotes (izquierda) y en semicontinuo (derecha). En gris las señales correspondientes a VAc y en negro a AN.

En la Tabla 2 se resumen los resultados del análisis, tanto para sistema por lotes como semicontinuo. Se observa que para los copolímeros sintetizados en semicontinuo la composición para las muestras tomadas a diferentes tiempos se mantiene constante, esto debido a que una alimentación dosificada del AN no permite que el monómero más reactivo se incorpore con mayor presencia en el copolímero, mientras que para el sistema por lotes la cantidad de AN en el copolímero es más alta, por ser el monómero que tiene un mayor valor en reactividad.

Tabla 2. Porcentaje de comonómero Acrilonitrilo (AN) en los copolímeros paramuestras tomadas a diferentes tiempos de reacción para sistemas en lotes y semicontinuo

tiempo (h)	Intensidad de señal		Relación (1431/931)	Porcentaje % de AN en el copolímero
	PAN (1453)	PVAC (931)		
Lotes				
4	99.53	99.65	0.99879579	59.48
6	96.56	96.8	0.99752066	60.03
8	95.18	96.08	0.99063281	63.02
Semicontinuo				
2	96.58	95.33	1.01311235	53.25
4	93.73	91.65	1.02269504	49.08
6	86.45	75.86	1.13959926	47.61
8	90.22	82.15	1.09823494	48.62

En la Figura 4 se muestran los termogramas para las muestras obtenidas en los sistemas por lotes y semicontinuo. Para el sistema batch (izquierda), tanto para 8 como 2 horas de reacción, se observa un cambio en la pendiente, que indica el valor de Tg, muy cercano a 80° C, valor correspondiente a la Tg del AN. Nótese que a mayor tiempo de reacción el valor de Tg se desplaza hacia temperaturas más bajas. Esto se debe a que, a tiempos cortos de reacción, debido a su alta reactividad, el acrilonitrilo predomina en la composición del copolímero. Sin embargo, conforme pasa el tiempo, el VAc se incorpora a la cadena, haciendo que se desplace la Tg hacia valores más bajos. También, es posible detectar la presencia de la Tg para el VAc, alrededor de los 30° C. El hecho de que se encuentren las señales para la Tg de ambos monómeros indica una estructura en bloque.

Para el sistema semibatch (derecha), se observa que para 2 horas de reacción existe una señal entre 40-50°C que no corresponde al valor de Tg de alguno de los monómeros, mientras que en la muestra tomada a 4 horas no es posible identificar algún valor de temperatura de transición vítrea. Para la muestra a 8 horas es posible identificar una señal cercana a 80°C. Estos resultados indican que a tiempos cortos de reacción se tiene una microestructura alternada y que conforme avanza la polimerización se va perdiendo este arreglo debido a una mayor presencia de acrilonitrilo. Esto podría deberse a que los volúmenes empleados durante la experimentación son muy pequeños, por lo que cualquier variación en la alimentación del acrilonitrilo influye en la relación molar de monómeros en la mezcla de reacción.

Mediante la ecuación de Fox se procedió a calcular el valor de Tg resultante para las copolimerizaciones:

$$\frac{1}{Tg} = \frac{W_A}{Tg_A} + \frac{W_B}{Tg_B}$$

donde W_A y W_B son la fracción peso para el monómero A y B, el valor de Tg en K. Considerando los valores de alimentación, se tiene:

$$\frac{1}{Tg} = \frac{0.3812}{353 \text{ } ^\circ K} + \frac{0.618}{301} = 318.9 \text{ } ^\circ K = 45.9 \text{ } ^\circ C$$

El valor obtenido por la ecuación de Fox y el que se aprecia en el termograma para el sistema semicontinuo, para la muestra de dos horas son cercanos, además, que al solo ser observable una solo señal para el sistema semibatch se confirma que existe una estructura alternada. Sin embargo, en el termograma para el sistema semibatch a 8 horas de reacción se localizan dos señales, correspondientes a la Tg de cada monómero. Esto indica que no se logra un control adecuado de la composición a mayor tiempo de reacción. Esto sugiere que a mayor volumen de reacción es posible evitar variaciones.

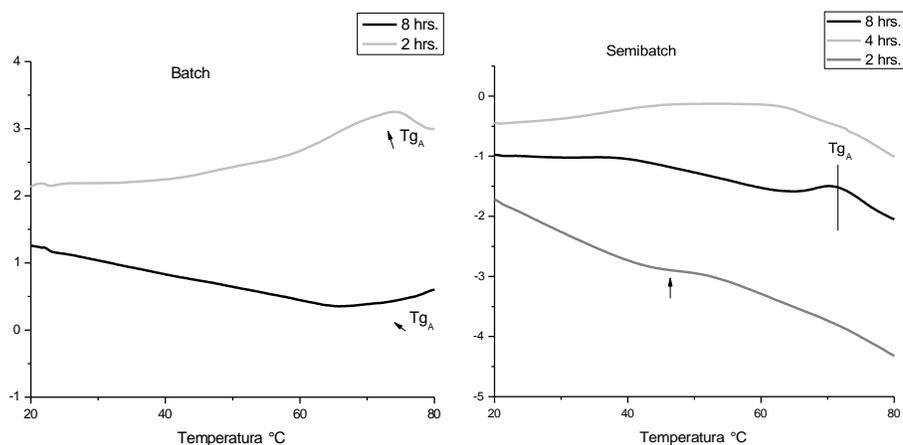


Figura 4. Termogramas para diferentes tiempos de reacción para polimerizaciones por lotes (izquierda) y en semicontinuo (derecha) para los copolímeros AN-VAc sintetizados con la finalidad de obtener una composición equimolar de comonómeros.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se logró obtener experimentalmente un copolímero con microestructura alternada para un par de monómeros con amplia diferencia en reactividad, acrilonitrilo (AN) y acetato de vinilo (VAc) mediante el control de la adición del monómero más reactivo, AN, a la mezcla de reacción.

Respecto a la composición del copolímero, las copolimerizaciones por lotes presentan un mayor porcentaje AN para todas las muestras, tomadas a diferentes tiempos de reacción, incrementándose

conforme aumenta el tiempo. Para ocho horas de reacción se obtuvo un 63% de

AN en el copolímero, mientras que para el sistema semicontinuo la composición del copolímero se mantuvo constante durante toda la reacción, con un 50% de AN. Con referencia a la microestructura, el análisis de calorimetría diferencial de barrido muestra que para los copolímeros sintetizados en sistema batch se observaron dos señales a 28 y 80 °C, aproximadamente, correspondientes a las temperaturas de transición vítrea, T_g, para el PVAc y PAN, respectivamente, mientras que para la síntesis en sistema semibatch, para muestras a tiempos de reacción cortos (2 hr), se localizó una sola señal a una temperatura intermedia, 46 °C, a las temperaturas de transición vítrea de los homopolímeros. Este valor se comparó con el valor calculado por la ecuación de Fox para la T_g considerando una composición equimolar 0.5 encontrándose que el resultado teórico es semejante al experimental. La presencia de una sola señal para la T_g confirma la microestructura alternada esperada al mantener constante la composición.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses..

REFERENCIAS

- Arzamendi, G.; Asua, J. M. (1989) Monomer Addition Policies for Copolymer Composition Control in Semicontinuous Emulsion Copolymerization. *Journal of Applied Polymer Science*, 38 (11): 2019-2036.
- D'amelia R. P.; Gentile, S; Nirode, W.; Huang, L. (2016), Quantitative Analysis of Copolymers and Blends of Polyvinyl Acetate (PVAc) Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Elemental Analysis (EA), *World Journal of Chemical Education*, 4, 25-31. DOI:10.12691/WJCE-4-2-1
- Dubé, M. A.; Soares, J.B.P. Penlidis, A., Hamielec, A. (1997) Mathematical Modeling of Multicomponent Chain-Growth Polymerizations in Batch, Semibatch, and Continuous Reactors: A Review. *Ind. Eng. Chem.*, 36 (4): 966-1015.
- Lutz, J. F.; Ouchi, M.; Sawamoto, M. (2013), Sequence-Controlled Polymers, *Science*, 341 (6146): 6880-6894. DOI: 10.1126/science.1238149
- Satoh, K.; Ozawa, S.; Mizutani, M.; Nagai, k.; Kamigaito, M. (2010) Sequence-regulated vinyl copolymers by metal-catalysed step-growth radical polymerization, *Nature communications* 1 (6): 1-6. <https://doi.org/10.1038/ncomms1004>.
- Renuka, K. B.; Madivanane, R. (2012), Normal coordinate analysis of poly vinyl acetate, *Engineering Science and Technology: An International Journal*, 4 (2), 795-799.
- Rivera, M; Rodriguez, A.; Hernández, N; Castillo, P; Saldivar, E; Rios, L. (2005) Controlled/living Free Radical Copolymerization of Styrene and Butyl Acrylate in Bulk and Emulsion with Industrial Monomers. Influence of Monomer Addition on Polymer Properties, *Ind. Eng. Chem.*, 44 (8): 2792-2801.

COMPARACIÓN DE MÉTODOS INDIRECTOS PARA LA MEDICIÓN DEL RADIO TERRÁQUEO, PROPUESTA BASADA EN LA DENSIDAD

COMPARISON OF INDIRECT METHODS FOR MEASURING THE EARTH'S RADIUS, A PROPOSAL BASED ON DENSITY

Jorge Ordoñez-Briones, Alexander Martínez-Delgado, Daniela Flores – López, M.A. Carrasco-Aguilar*.

Universidad Autónoma de Tlaxcala, Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología.

*Email: macarras2010@gmail.com

Recibido: 15 de Marzo de 2024

Aceptado: 17 de junio de 2024

RESUMEN

En éste artículo se presenta una comparación de tres métodos indirectos para obtener el radio de la tierra. El primero consiste en la determinación del punto subsolar y es parecido al realizado por Eratóstenes en el año 240 a.C., la diferencia es que el método utilizado puede hacerse experimentalmente cualquier día del año bajo ciertas circunstancias. El segundo se basa en la determinación de una sección del área terrestre mediante el uso de triángulos y rectángulos, y el tercero que no ha sido reportado, toma en cuenta la densidad de la tierra. Para el primer método mencionado se consideran las coordenadas geográficas propias de la ciudad de Apizaco, Tlaxcala

Palabras Clave: Punto subsolar, área terrestre, densidad de la tierra, coordenadas geográficas

ABSTRACT

This article presents a comparison of three indirect methods to obtain the radius of the earth. The first consists of the determination of the subsolar point and is similar to that carried out by Eratosthenes in the year 240 BC, the difference is that the method used can be done experimentally any day of the year under certain circumstances. The second is based on determining a section of the earth's area through the use of triangles and rectangles, and the third, which has not been reported, takes into account the density of the earth. For the first mentioned method, the geographical circumstances of the city of Apizaco, Tlaxcala are considered.

Keywords: Subsolar point, land area, land density, geographical coordinates

1. INTRODUCCIÓN

La tierra es el planeta más denso del sistema solar, ocupa el tercer sitio respecto a la distancia al sol y con respecto a su tamaño ocupa el quinto lugar. Se estima que comenzó a formarse hace 4,550 (Anguita, 2011) millones de años y los seres humanos modernos hemos vivido en ella desde hace aproximadamente 200,000 años (Anguita, 2011), tiempo suficiente para realizar estimaciones de algunas de sus características como lo es el diámetro. Para encontrar la primera medición de éste parámetro, hay que remontarse al año 240 a.C., cuando el filósofo, astrónomo, matemático y geógrafo griego Eratóstenes (Paléfato y col., 2009) basado en la medición del ángulo del sol

incidente en las ciudades de Siena y Alejandría durante el solsticio determinó que el radio de la tierra estaría entre 6,244 Km y 7,358 Km. Dicho rango de estimación se obtiene, debido a que las medidas en esa época no estaban estandarizadas.

Hoy en día, la medida estimada más precisa es de 6,371 Km, definida gracias a los avances en sismología, que utiliza las ondas sísmicas sobre las capas internas del planeta, que de manera indirecta arrojan éste resultado.

Otros personajes de la historia (“Circunferencia de la Tierra”, 2024), que obtuvieron estimaciones de las medidas del globo terrestre fueron: Posidonio alrededor del año 100 a.C. y Aryabhata en el año 525 d.C., sin embargo, sus estimaciones difieren en alto porcentaje con el valor real.

Otro enfoque igualmente explotado para alcanzar el objetivo propuesto es a través de la óptica geométrica basada en la disposición de triángulos en la superficie terrestre y su representación dentro de un rectángulo. En éste contexto se pretende iniciar, proponiendo una cantidad de triángulos que puedan encajar en una cuarta parte de la superficie terrestre, de tal manera que podamos obtener un área rectangular equivalente a la superficie terrestre considerada, que indirectamente me generaría un resultado para el radio. A éste método se le conoce como método de la triangulación (Triangulación) cuyo uso se remonta al Antiguo Egipto. Tales en el siglo VI a.C. emplea triángulos para calcular la altura de las pirámides a través de sombras. En el año 1048 los agrimensores (cartógrafos en la actualidad) árabes utilizaron métodos de triangulación para medir grandes distancias, entre ellos destaca Al Biruni quién uso técnicas de triangulación para medir el tamaño de la Tierra y las distancias entre diversos lugares. La triangulación de superficies es un método para obtener áreas de superficies irregulares mediante la descomposición en formas triangulares, evidentemente, la suma de las áreas de los triángulos da como resultado el área total.

El método de la densidad nace a partir de la consideración de que la luna nació a partir de una explosión de detritos producida a raíz de la colisión de un protoplaneta del tamaño de Marte, llamado Tea, contra la Tierra (Anguita, 2011). Se piensa que el impacto pudo haber sucedido hace aproximadamente 4,533 millones de años, destruyendo Tea y expulsando la mayor parte de su manto y una fracción significativa del manto terrestre hacia el espacio, mientras que el núcleo de Tea se hundió dentro del núcleo terrestre. Estimaciones actuales basadas en simulación sugieren que el 2% de la masa original de Tea acabó formando un disco de escombros, la mitad del cual se fusionó para formar la Luna de 1 a 100 años después del impacto. Por lo anterior conociendo algunas características de la luna y tomando en cuenta que comparten densidades similares, ya que su composición provendría de Tea y de la misma Tierra, se podría obtener una aproximación del radio terrestre.

1. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS

2.1. Emulación del método de Eratóstenes

Calcular el radio terrestre utilizando el método de Eratóstenes es un método bien documentado (más de 35.000 resultados en buscador de Google), que se resume en localizar dos lugares

diferentes sobre un mismo meridiano en un solsticio dado (de verano o invierno) y hacer mediciones de la distancia que los separa y de la sombra que produce un varilla perpendicular a la tierra en uno de los lugares en el medio día solar, para después generar las relaciones geométricas necesarias que nos permiten obtener indirectamente el radio requerido. Como vemos, para llevarlo a cabo es necesario localizar los lugares, que generalmente estarán separados por una distancia de cientos de kilómetros y hacerlo en un día específico del año. Aquí utilizamos un método (Troughton y Esteban, 2018; Sociedad Malagueña de Astronomía SMA, 2018, 21m36s) que mediante una sola medida cualquier día del año y determinando el mediodía subsolar, puede alcanzar el objetivo propuesto, utilizando un palo recto en posición vertical, un reloj, una cinta métrica y conexión a Internet. Para llevar a cabo el experimento, se coloca en primer lugar la varilla vertical sobre un suelo plano y se mide su longitud L y la sombra que arroja sobre el suelo. El cociente entre la sombra (s) y la longitud de la varilla (L) nos da la tangente del ángulo α que forman los rayos solares con la vertical, de donde se obtiene el ángulo mencionado, de la siguiente manera:

$$\tan \alpha = \frac{\text{longitud sombra}}{\text{longitud varilla}} = \frac{s}{L} \quad (1)$$

Por lo tanto:

$$\alpha = \text{arc tan } s/L \quad (2)$$

El cálculo aproximado también puede hacerse trazando un triángulo rectángulo semejante y midiendo el ángulo con un transportador como se muestra en la Figura 1. El ángulo complementario $90^\circ - \alpha$ nos permite saber a qué altura está el sol sobre el horizonte.

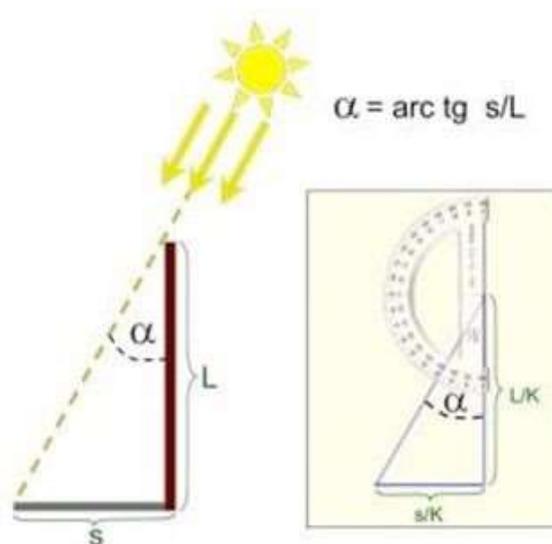


Figura 1 Medición de α mediante un transportador sobre un triángulo semejante

El experimento a realizar, toma en cuenta si se lleva a cabo en el período de primavera -verano u otoño-invierno, en el hemisferio sur o hemisferio norte. Para nuestro caso se lleva a cabo en la ciudad de Apizaco situada en el hemisferio norte durante el Otoño (Octubre). Como podemos observar en la Figura 2 existe una relación que guarda el ángulo de incidencia α con la latitud del lugar de observación λ y la declinación solar δ , que podemos expresar como:

$$\alpha = |\delta - \lambda| \text{ (hemisferio norte en otoño, la sombra se dirige al sur)} \quad (3)$$

En la fórmula anterior el valor $\delta - \lambda$ se traduce en una adición de ángulos pues la declinación solar δ es negativa debido a que el sol está por debajo del ecuador en esta época del año. Como se ve en la Figura 2 los rayos del sol inciden perpendicularmente entre el Ecuador y el Trópico de Capricornio y por lo tanto la varilla vertical situada en A no dará sombra, mientras que en nuestra latitud se producirá una sombra. Se hace el experimento al mediodía solar del lugar donde se lleva a cabo el experimento, se mide la sombra y se calcula el ángulo α .

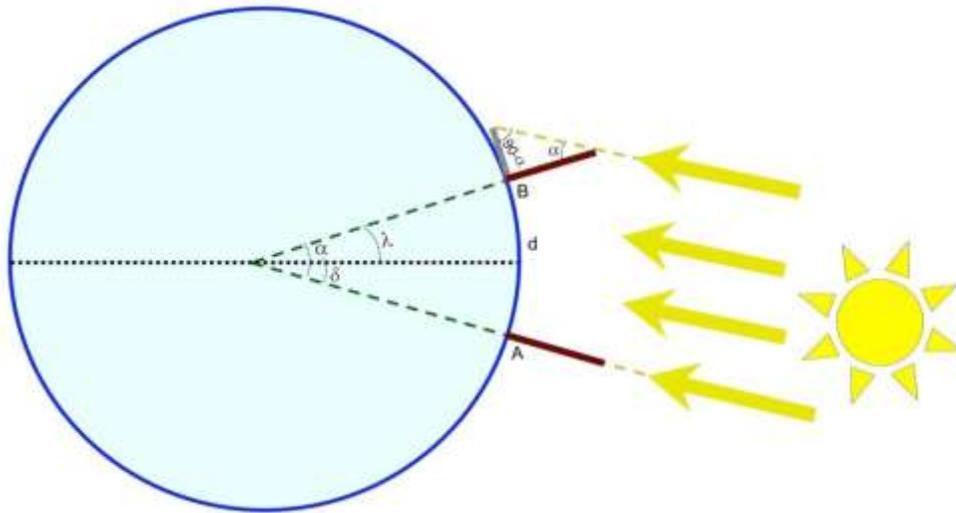


Figura 2. Incidencia de rayos solares sobre la Tierra en el periodo otoño-invierno en el hemisferio norte

Conociendo el valor de α y la latitud λ del lugar de observación (Apizaco), podemos despejar de $\alpha = \delta - \lambda$ el valor de la declinación solar δ . Buscamos el lugar en la Tierra que tiene por coordenadas en latitud la declinación solar (δ) y por longitud la misma donde hacemos la medida, es decir, en el mismo meridiano.

Con estos datos abrimos el programa de Google Earth (<https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>), nos posicionamos en el lugar donde realizamos la medida, con las coordenadas de latitud (λ) y longitud (δ_1). Lo marcamos colocando una chincheta en el mismo. A continuación, marcamos otra chincheta y le introducimos por latitud la declinación solar (δ) que hemos calculado y por longitud la misma coordenada de longitud (δ_1) de nuestro lugar de observación. Nos alejamos con el zoom para ver donde se ha posicionado esta chincheta. Con la herramienta "Regla" nos situamos sobre la primera chincheta (lugar de la medida) y nos

desplazamos con el ratón hasta la segunda chincheta (lugar donde a la hora del experimento el Sol cae perpendicularmente) y se nos indica en una ventana la distancia (d) que hay entre ambos lugares (en km). Ahora solo hay que hacer una proporción o regla de tres directa:

$$\frac{\alpha}{QRS} = \frac{d}{P} \quad (4)$$

siendo P el perímetro de la Tierra. Despejamos P :

$$P = 360^\circ \cdot \frac{d}{\alpha} \quad (5)$$

Como el perímetro de la circunferencia es $P = 2\pi r$, siendo r el radio de la misma, igualando ambos valores equivalentes y despegando r , tenemos:

$$r = 360^\circ \cdot \frac{d}{2\pi\alpha} \quad (6)$$

Para determinar la precisión de la medida, calculamos el Error Absoluto tomando como valor verdadero del radio de la Tierra 6.371 km,

$$Ea = |6731 - r| \quad (7)$$

y a partir de él calculamos el Error Relativo,

$$Er = Ea/6731 \quad (8)$$

2.2. Método de Triangulación

El método de la triangulación básicamente consiste en colocar triángulos de dimensiones conocidas sobre la superficie desconocida, tratando de abarcar el máximo posible de dicha superficie, para después sumar el área de los triángulos, que finalmente representarían el área total. Para una superficie circular como la tierra, las bases de los triángulos podrían verse como los lados de un polígono que conforme aumenta el número de lados se aproxima al área del círculo como se ve en la Figura 3.

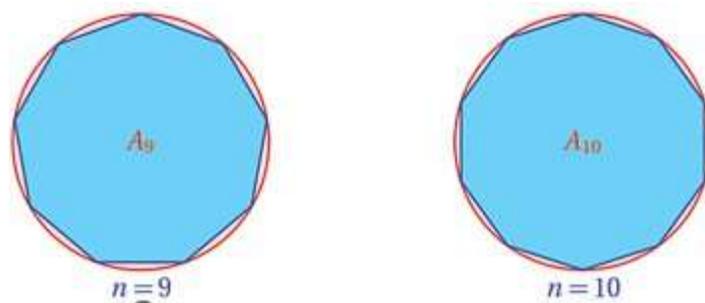


Figura 3. Conforme aumenta el número de lados del polígono, el área del polígono se aproxima al área del círculo

Los vértices de los triángulos coinciden con el centro del círculo, como podemos ver en la Figura 4

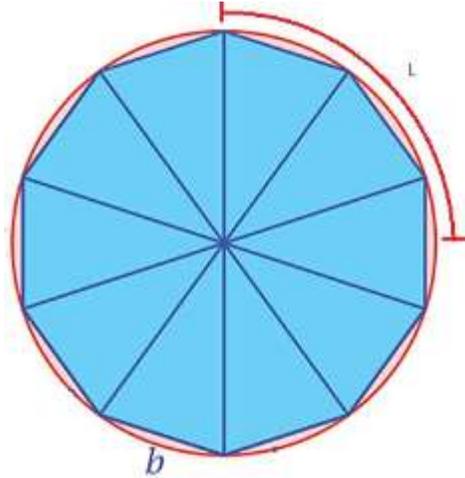


Figura 4. Superficie del círculo representada por triángulos.

Para nuestro caso, no sabemos el radio del círculo (radio de la tierra), por lo tanto procedemos a obtener la distancia de una cuarta parte del perímetro terrestre (L de la Figura 4) por medio de Google Earth, una vez obtenido este parámetro, determinamos cuantos triángulos cuya base conocida abarcan ésta distancia y la complementamos con triángulos semejantes para formar una superficie rectangular (Ver Figura 5), que finalmente se iguala con la cuarta parte de la superficie del círculo, para poder despejar el radio de la tierra. Las relaciones que se obtienen son las siguientes:

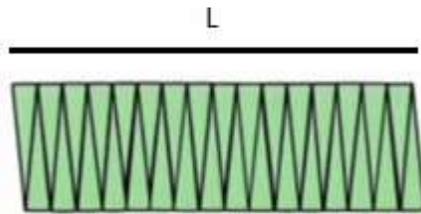


Figura 5. Los triángulos que abarcan la longitud L de la cuarta parte del perímetro de la tierra y sus complementarios que forman una superficie rectangular

$$A_C = A_R \tag{9}$$

Como sólo representamos una cuarta parte del perímetro del círculo entonces:

$$\frac{\pi r^2}{4} = Lr \tag{10}$$

De donde podemos despejar el valor de r.

2.3. Método de la Densidad

Este método aún no documentado consiste en considerar que la densidad de la luna es una fracción de la de la tierra, y se basa en la teoría del gran impacto respecto a la formación de la luna, la cual sugiere que hace 4,500 millones de años aproximadamente, un objeto del tamaño de marte llamado Tea se estrelló contra la tierra primitiva, y de los escombros originados por el impacto se formó nuestro satélite, así que podríamos considerar que su composición es mayoritariamente parecida a la composición de nuestro planeta, y por lo mismo comparten algunas de sus características, entre ellas la densidad, que se define como la relación de masa sobre volumen, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{M}{V} \quad (11)$$

Tomando en cuenta lo anterior, y evidenciando que la masa de la luna y su volumen no es igual al de la tierra, podemos considerar que:

$$\begin{aligned} \delta_T &= K\delta_L \\ \frac{M_T}{V_T} &= K \frac{M_L}{V_L} \end{aligned} \quad (12)$$

Donde K representa una constante de proporcionalidad, M_T y V_T la masa y el volumen de la tierra y M_L y V_L lo correspondiente para la luna. Tomando como datos conocidos las masas y el volumen de la luna, y notando que el volumen de la tierra queda en función de su radio, entonces podemos despejar el radio y obtener su valor.

2. PROCEDIMIENTOS Y RESULTADOS

3.1. Método de Eratóstenes modificado

Para aplicar el método, seguimos los siguientes pasos:

1. Investigamos a qué hora ocurre el medio día solar en Apizaco para la fecha en que se llevó a cabo el experimento, que fue el día 31 de Octubre cuyo mediodía solar ocurrió a las 12.37 hrs. Se dispusieron los elementos del experimento unos minutos antes, colocándose la varilla de madera en una superficie plana, para lo cual se eligió el techo del aula.
2. Colocamos una varilla perpendicular a una superficie plana, medimos su altura y la sombra proyectada, como se muestra en la Figura 6. Los valores obtenidos fueron 62.9 cm de altura y 38.9 cm de sombra, mismas que nos permitieron conocer el valor de α , de acuerdo a la Ecuación 2, siendo ésta de 31.73° .
3. Investigamos cuanta distancia hay entre donde nos ubicamos y el lugar donde no se proyecta sombra utilizando la Ecuación 3, donde la latitud de la Facultad de Ingeniería en Apizaco (Google Earth) es $\lambda=19.4225^\circ$ por lo que el valor de δ es de -12.31° , el signo menos nos indica que está abajo del Ecuador.
4. Localizamos ésta latitud sobre el mismo meridiano apoyándonos en la aplicación Google

Earth obteniendo que la distancia d es de 3,500.4 Km, como puede verse en la Figura 7.

5. Calculamos el radio de la tierra despejando α de la Ecuación 4, considerando que es el valor absoluto de la resta $\delta-\lambda$, entonces $\alpha= 31.72$. Substituyendo d y α en la Ecuación 6 se llega al valor de $r = 6322.76$ Km.

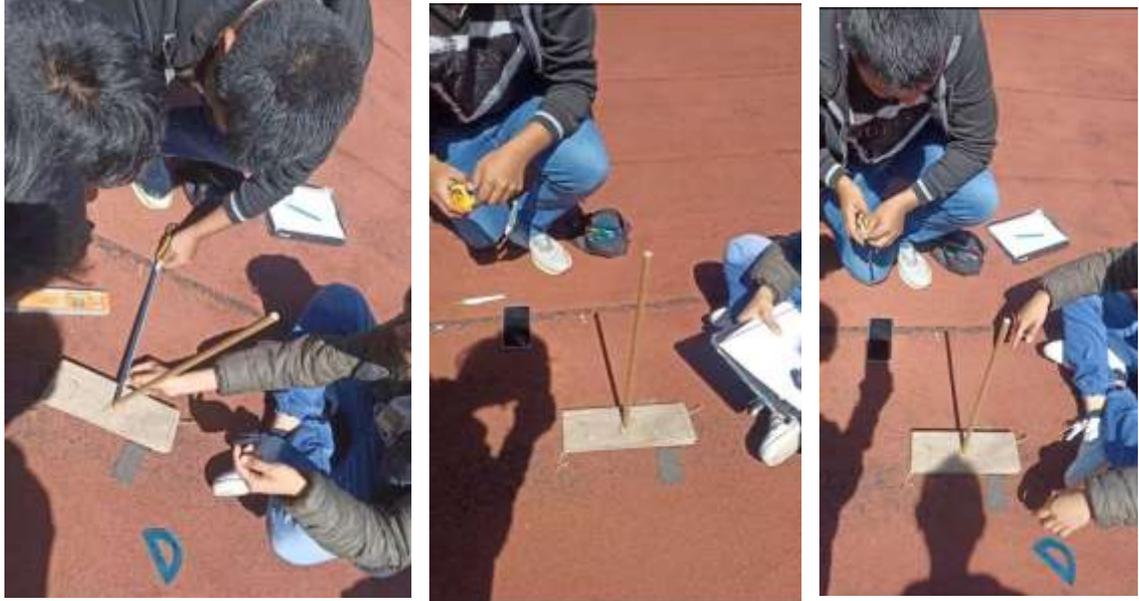


Figura 6. Colocación de la varilla sobre una superficie plana y medición de la sombra proyectada hacia el sur.

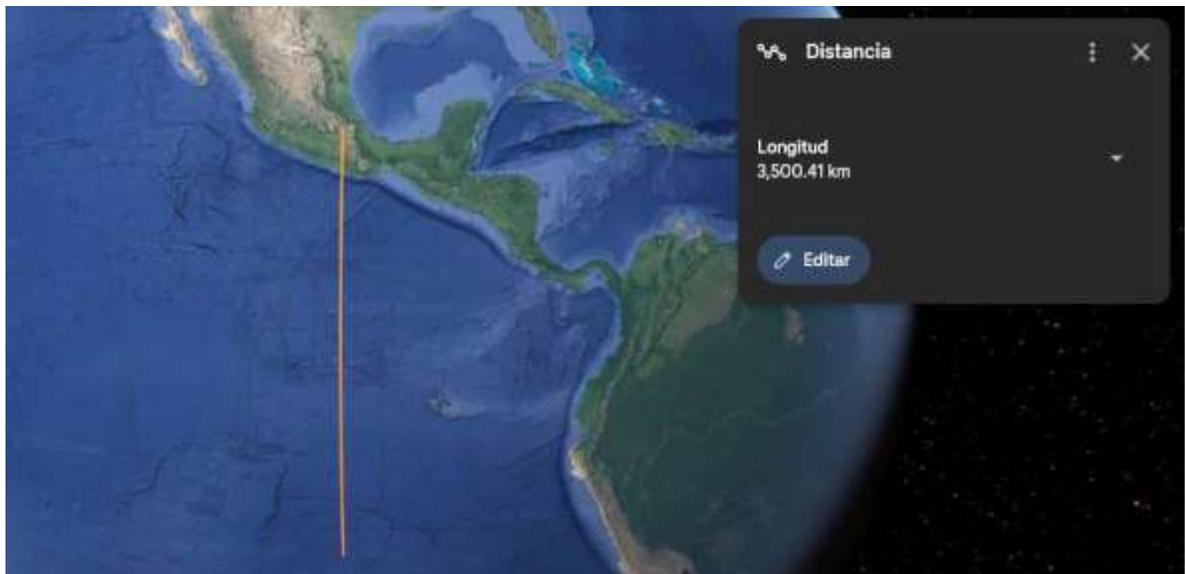


Figura 7. Obtención de la distancia entre la latitud de Apizaco, Tlaxcala y la declinación solar δ sobre el mismo meridiano

3.2. Método de triangulación

Se siguieron los siguientes pasos:

- 1.- Se obtuvo la distancia L que representa una cuarta parte del perímetro de la tierra, con ayuda de Google Earth, fijando las coordenadas de altitud a 90° y 0° (El Ecuador), sobre un mismo meridiano, ver Figura 8.

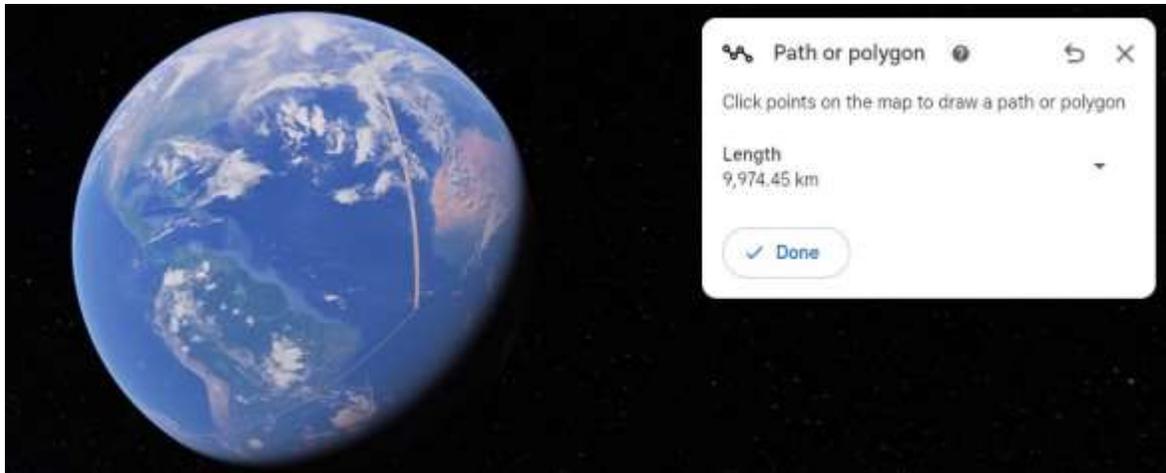


Figura 8. Distancia dada por Google Earth a altitud 90° y 0° , obteniendo 9974.45 Km

2. Definimos triángulos de base 1 Km. y los acomodamos sobre la longitud L , considerando que un número igual de triángulos inferiores generan la superficie rectangular, cuyo lado menor coincide con el radio terrestre y con la altura de los triángulos. En total, el número de triángulos fue de $n=9974.45$.
3. Se iguala la cuarta parte del área del círculo con el área del rectángulo representada indirectamente por 2 veces el número de triángulos del punto 2, quedando en función del radio de la siguiente manera:

$$\frac{A_c}{4} = 2 n A_r \quad (13)$$

$$2 \pi \frac{r^2}{4} = 2 n b \frac{r}{2} \quad (14)$$

Despejando r , tenemos:

$$r = \frac{4nb}{2\pi} \quad (15)$$

Sustituyendo valores obtenemos que $r = 6\,349.93$ Km.

3.3. Método de la densidad

Los pasos que seguimos para aplicar este método fueron los siguientes:

1. Se investiga la masa de la tierra, la fuerza gravitacional entre la tierra y la luna, y la distancia que las separa y substituyendo estos valores en la relación que establece la ley de gravitación universal, se obtiene la masa de la luna, es decir:

$$F = \frac{uvvVx}{y^2} \quad (16)$$

Y considerando que,

$$G = 6.67 \times 10^{11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{Kg}^2}, \quad m = 5.9722 \times 10^{24} \text{ Kg}$$

$$F = 1.986 \times 10^{25} \text{ N}, \quad d = 3.844 \times 10^8 \text{ Km}$$

Entonces:

$$m_L = 7.367 \times 10^{22} \text{ Kg}$$

2. Se investiga la densidad de la tierra y de la luna, y bajo la hipótesis de que las densidades son iguales, con la excepción de sus dimensiones, se agrega una constante de proporcionalidad, de tal manera que:

$$\delta_T = 5515 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{y} \quad \delta_L = 3340 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Igualando ambas densidades con la constante de proporcionalidad se tiene:

$$\delta_T = 1.6512 \delta_L$$

Sabiendo que la densidad se puede expresar como la relación masa y volumen ($\delta = M/V$),

y tomando en cuenta que el volumen de una esfera es $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ entonces:

$$\frac{m_T}{\frac{4}{3}\pi r_T^3} = 1.6512 \frac{m_L}{\frac{4}{3}\pi r_L^3}$$

Sabiendo (<https://brainly.lat/tarea/17437663>) que el radio de la luna es $r_L = 1,738 \text{ Km}$, entonces:

$$r_T^3 = \frac{m_T r_L^3}{1.6512 m_L}$$

Substituyendo los valores dados, tenemos que $r_T = 6364.01 \text{ Km}$

A continuación, se presenta una tabla de los valores obtenidos por los tres métodos, junto al error absoluto y el error relativo respecto al valor asumido como el verdadero por distintas fuentes.

Tabla 1. Valores obtenidos por los tres métodos utilizados.

Método	Valor verdadero (Km)	Valor obtenido (Km)	Error absoluto (km)	Error relativo (%)
Eratóstenes modificado	6,371	6,322.76	48.24	0.757
Triangulación		6,349.93	21.57	0.338
Densidad		6364.01	6.99	0.11

4. CONCLUSIONES

Se han explorado los métodos que a través del tiempo han perdurado, lo que nos ha permitido darnos cuenta de que los métodos aplicados hace más de 2000 años tienen una exactitud cuya aproximación y error se deben en buena medida a la inexistencia de patrones de medición standard. Aunque los métodos antiguos exigían algunas acciones que implicaban la supervisión y ocupación directa del hombre, aquí pudimos darnos cuenta y sopesar la diferencia entre el uso de nuevas tecnologías como la aplicación de Google Earth y los métodos anteriores. Se estima un error del 15%, obtenido originalmente por Eratóstenes contra errores menores al 1% con las herramientas actuales. Hasta donde los autores hemos investigado no se ha hecho una propuesta para medir el radio de la tierra por el método de la densidad, que fue el que nos dio una mejor aproximación. Sin embargo su aplicación requirió de una colección mayor de datos ya establecidos, tales como la masa de la tierra, la masa de la luna, el radio de la luna y sus densidades correspondientes. Algunas de ellas como el radio de la luna no pudimos obtenerla por medio de Google Earth, ya que se requería una aplicación de versión 5.0 que ya no estuvo disponible en las URL que investigamos. Se pudo apreciar la contribución de las nuevas tecnologías, así como la evolución de la investigación sobre un tema muy sencillo, que finalmente nos muestra el camino para seguir realizando contribuciones en las distintas áreas de nuestra especialidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la contribución invaluable del grupo de la materia de Epistemología y Metodología para las Ciencias Básicas del primer semestre de la Carrera de Ingeniería en Sistemas Electrónicos, quienes por razones de espacio y características de la revista no podemos incluir en el encabezado. Gracias a todos.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Anguita F. (2011) Biografía de la Tierra. Madrid, España. Aguilar

Circunferencia de la Tierra, www.wikiwand.com/es/Circunferencia_de_la_Tierra, España (Marzo,2024)

Paléfato, Heráclito, Anónimo Vaticano, Eratóstenes, Aneo Cornuto (2009). 376. Mitógrafos griegos. Madrid. Editorial Gredos. ISBN 978-84-249-3590-0.

Sociedad Malagueña de Astronomía (SMA). Medir el radio de la Tierra cualquier día del año [Archivo de video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=mkDX-GYHytg&t=1804s> (13 de Abril de 2021)

Wikipedia. Triangulación, <https://es.wikipedia.org/wiki/Triangulación> (7 de Marzo del 2024)

Troughton B., Esteban E. (2018) Métodos alternativos para medir el radio de la Tierra, *Revista Astronomía, II Época*, Año XXXIII, N° 225.

VENCIENDO AL TIEMPO: MATEMÁTICAS QUE PERDURAN BEATING TIME: MATHEMATICS THAT LASTS.

Brian Candia-Arochi, Misael Hernández-Hernández, Fernando Muñoz-Bautista, Araceli López-y-López*.

Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Calzada Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala, 90300, México

*Email: araceli.lopez@uatx.mx

Recibido: 03 de junio de 2024

Aceptado: 27 de septiembre de 2024

RESUMEN

Pasa el tiempo y si los conceptos matemáticos aprendidos, no se utilizan, se olvidan. ¿En qué medida permanecen en la memoria de los estudiantes? El presente trabajo tiene como objetivo averiguar en qué medida algunos conceptos de matemáticas perduran a través del tiempo, se creó un cuestionario de preguntas programado en Quizizz y se aplicó a estudiantes de sexto y octavo semestre de la Licenciatura en Matemáticas de la Universidad Autónoma de Tlaxcala. Los resultados mostraron que, en general, los alumnos de sexto semestre tienen un mayor dominio de los conceptos en comparación con los de octavo semestre. Esta iniciativa ha permitido medir de manera efectiva el conocimiento de los estudiantes en áreas clave de la Licenciatura y analizar los datos obtenidos para comprender mejor el nivel de retención y dominio de los conceptos a lo largo del tiempo.

Palabras Clave: matemáticas universitarias, instrumento de evaluación del aprendizaje, álgebra lineal, cálculo integral, programación orientada a objetos.

ABSTRACT

Time passes and if the mathematical concepts learned are not used, they are forgotten. To what extent do they remain in the memory of students? The present work aims to find out to what extent some mathematical concepts endure over time. A questionnaire programmed in Quizizz was created and applied to sixth and eighth semester students of the Bachelor's Degree in Mathematics at the Autonomous University of Tlaxcala. The results showed that, in general, sixth semester students have a greater mastery of the concepts compared to eighth semester students. This initiative has allowed us to effectively measure students' knowledge in key areas of the Bachelor's Degree and analyze the data obtained to better understand the level of retention and mastery of the concepts over time.

Keywords: College Mathematics, Learning Assessment Instrument, Linear Algebra, Integral Calculus, Object Oriented Programming.

1. INTRODUCCIÓN

En matemáticas es importante recordar conceptos tales como subespacios vectoriales, operador lineal, teorema del valor medio, por mencionar algunos, porque se encuentran entrelazados para aprender otros más, así, por ejemplo, en Optimización Lineal se utilizan matrices, determinantes e inversas de ellas, para poder resolver un problema de programación lineal. Por esta razón es importante indagar cuáles conocimientos matemáticos perduran en la memoria de los estudiantes a través del tiempo. Al respecto, los autores elaboraron un instrumento de evaluación, el cual fue validado por profesores de la Licenciatura de Matemáticas Aplicadas de la Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx), en el período otoño de 2023.

El instrumento consta de una selección de preguntas relacionadas con tres unidades de aprendizaje (UA) fundamentales para el tercer semestre de la Licenciatura, abarcando algunos temas integrados en los respectivos programas analíticos, dichas unidades son: Álgebra Lineal Avanzada, Cálculo Integral y Programación Orientada a Objetos.

En la actividad integradora del cuarto semestre del periodo primavera 2024, el instrumento fue aplicado a estudiantes de sexto y octavo semestre de la Licenciatura, con el objetivo de responder a la siguiente pregunta: ¿En qué medida los estudiantes recuerdan algunos conceptos de matemáticas a lo largo del tiempo?

Para que los estudiantes se sintieran cómodos respondiendo a preguntas de matemáticas, el instrumento se diseñó de manera digital en la plataforma de Quizizz, reconocida por su capacidad de creación y personalización de cuestionarios educativos e interactivos. En la sección 2, se presenta brevemente la plataforma Quizizz, en la sección 3, algunas preguntas del instrumento elaborado por los autores de este trabajo y en la sección 4 se muestran los resultados obtenidos.

2. APRENDIZAJE A TRAVÉS DE QUIZIZZ.

Quizizz es una plataforma en línea gratuita (también tiene la versión de paga la cual permite más funciones) que permite a los usuarios crear, personalizar y responder cuestionarios educativos de manera interactiva (Quizizz).

Los usuarios pueden:

- Crear preguntas de opción múltiple, llenar el espacio en blanco, dibujar la respuesta, entre otros, según el tema que se desee evaluar.
- Personalizar la aplicación de la prueba, con herramientas tales como establecer un horario para la evaluación, límites de tiempo por pregunta, el número de intentos permitidos, presentar una imagen o mensaje ante alguna respuesta errónea, etc.
- Solicitar a la plataforma que genere hojas de cálculo, descargables o imprimibles, con las estadísticas de la prueba ya aplicada; esto como evaluador.
- Quizizz permite el acceso a los evaluados, mediante un código de seis dígitos que debe ser generado por el evaluador.
- La plataforma permite compartir el cuestionario con otras personas por medio del correo electrónico, de manera que las mismas puedan editarlo o aplicarlo.

Asimismo, los participantes responden a las preguntas en tiempo real y conocen su resultado instantáneamente o al finalizar la prueba, según el criterio del evaluador.

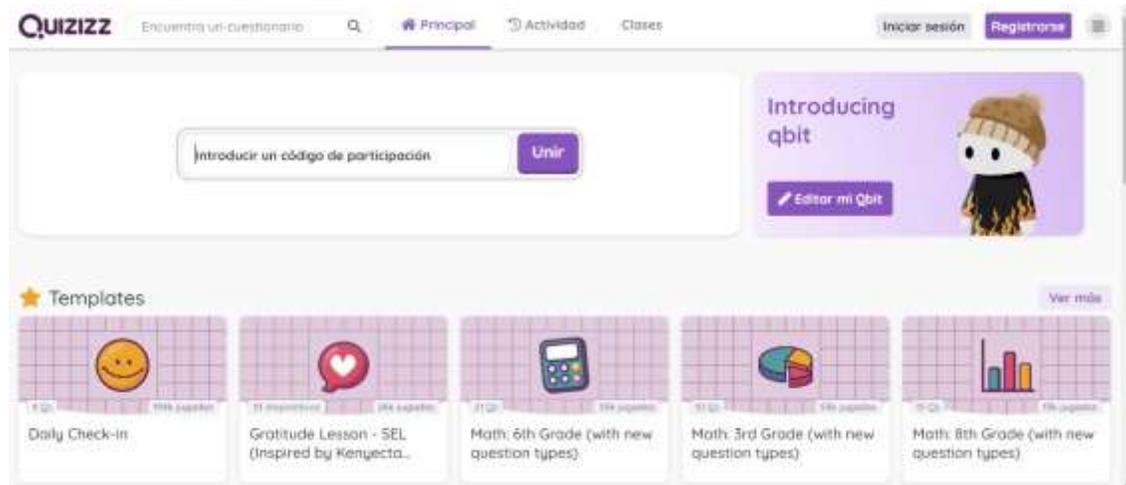


Figura 1. Tablero de la plataforma. Elaborado por Quizizz.

En la Figura 1 se puede apreciar el tablero de la plataforma toda vez que el usuario quiera introducir un código de participación o, si inicia sesión con su correo electrónico, puede crear sus propios cuestionarios.

Por lo anterior, Quizizz es una herramienta útil para evaluar el conocimiento y fomentar la participación en el aprendizaje.

3. PREGUNTAS DEL INSTRUMENTO

En esta sección se presentan algunas preguntas y respuestas del instrumento de evaluación, las cuales fueron validadas por los profesores que impartieron las UA del tercer semestre durante el periodo otoño 2023. Dicho instrumento consta de 12 preguntas de Álgebra Lineal Avanzada, 10 de Cálculo Integral y 10 de Programación Orientada a Objetos, evaluando algunos conceptos de matemáticas.

3.1. Preguntas y respuestas para la UA de Álgebra Lineal.

En esta UA se usó (Lipschutz, 1992) para elaborar preguntas y respuestas, algunas de ellas son:

- ¿Qué es un subespacio vectorial?

Respuestas:

- a) Es un conjunto de vectores linealmente dependientes, cumpliendo con las propiedades de cerradura bajo la suma y la multiplicación por un escalar.
- b) Un subespacio vectorial es un vector multiplicado por la identidad que forma una matriz triangular superior, cumpliendo con las propiedades de que la transpuesta de la matriz es igual a la matriz.
- c) Un subespacio vectorial es un subconjunto no vacío de vectores de V , que forma un espacio vectorial por sí mismo, cumpliendo con las propiedades de este.

- Si A y B son matrices similares de $n \times n$. Entonces:

Respuestas:

- a) Al menos una matriz es diagonal superior.
- b) Al multiplicarlas nos dará como resultado la identidad.
- c) La suma de la diagonal principal de A es igual a $\text{traza}(B)$.
- d) Cuando sus entradas respectivas son iguales.

- Supongamos que T es un operador lineal en un espacio vectorial V de dimensión finita, además T es inyectiva, también podemos decir que:

Respuestas:

- a) El determinante de T es igual a cero.
- b) Su polinomio característico tiene raíces distintas.
- c) $\text{Ker } T = \{0\}$.
- d) Ninguna de las anteriores.

3.2. Preguntas y respuestas para la UA de Programación Orientada a Objetos.

Para elaborar las preguntas y respuestas de Programación Orientada a Objetos se utilizó (Leon, 2015) y algunas de ellas son:

- ¿Qué es Python y cuál es su principal ventaja?

Respuestas:

- a) Python es un lenguaje de programación de alto nivel y su principal ventaja es su simplicidad y legibilidad de código.
- b) Es muy colorido en cuanto al diseño
- c) Es un lenguaje que tiende a ser muy complejo, pero que tiene funciones muy avanzadas y de suma importancia.
- d) Es un lenguaje que se centra en el ámbito de gráfica de funciones en 3D

- ¿Cómo declarar una variable en Python?

Respuestas:

- a) Utilizando el operador de asignación (=)
- b) Utilizando el operador de asignación (*)
- c) Utilizando el operador de asignación (+)
- d) Utilizando el operador de asignación (-)

- ¿Qué es un bucle "for" en Python?

Respuestas:

- a) Un bucle 'for' en Python es una estructura de control que permite repetir un bloque de código un número determinado de veces.
- b) Es una librería que nos permite hacer operaciones matemáticas extensas.
- c) Es un comando que nos permite generar arreglos fácilmente.

3.3. Preguntas y respuestas para la UA de Cálculo Integral.

Para elaborar las preguntas y respuestas de Cálculo integral se utilizó (Stewart, 2012) y algunas de ellas son:

- ¿Cómo se define la $\tan^{-1}(x)$?

Respuestas:

- a) $\tan^{-1}(x) = \theta \Leftrightarrow x = \tan(\theta)$
- b) $\tan^{-1}(x) = \theta \Leftrightarrow \frac{1}{\tan(\theta)} = x$
- c) $\tan^{-1}(x) = \theta \Leftrightarrow x = \cot(\theta)$

- De acuerdo con el Teorema del Valor Medio. Sea f una función continua en $[a, b]$ y derivable en (a, b) . Entonces existe al menos un número $c \in (a, b)$ tal que...

Respuestas:

- a) $f(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$
- b) $f'(c) = \frac{f'(b) - f'(a)}{b - a}$
- c) $f'(c) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$
- $\int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b |f(x)| dx$

Respuestas:

- a) Verdadero.
- b) Falso.

El instrumento de evaluación se aplicó a dos grupos de la Licenciatura en Matemáticas Aplicadas de la Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y Tecnología de la UATx.

El primer grupo lo integraron 5 alumnos de sexto semestre, quienes dieron respuesta al instrumento en un horario de las 8:00 - 9:00 horas del día viernes 23 de febrero de 2024.

El segundo grupo lo conformaron los 9 alumnos de octavo semestre, quienes, de manera similar, contestaron el instrumento de las 8:00 a las 9:00 horas del primero de marzo de 2024.

Cabe señalar que estos grupos ya cursaron Álgebra lineal, Cálculo Integral y Programación Orientada a Objetos, las cuales son UA del tercer semestre, el la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos después de aplicar el instrumento y se mencionan algunos de los conceptos que perduran en su memoria.

4. RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en cada grupo se muestran en la Figura 2.



Figura 2. . Porcentaje de aciertos del primer grupo en Álgebra Lineal Avanzada.

Se puede observar que el porcentaje de los aciertos que obtuvo el primer grupo en la unidad de Álgebra Lineal Avanzada fue del 63%. Se puede ver que los estudiantes de este grupo recuerdan bien los temas de la traza de una matriz, eigenvalores, operadores lineales, la definición de una matriz inversa y definición del producto interno canónico; en cambio, a los estudiantes se les complicó la definición de un espacio vectorial, en qué consiste el proceso de Gram-Schmidt y

definición del producto interno canónico. La mayor parte del grupo tuvo el mismo número de aciertos.

En la Figura 3 se puede observar que el porcentaje de los aciertos que obtuvo el segundo grupo en la unidad de Álgebra Lineal Avanzada fue del 54%. Se puede ver que los estudiantes de octavo semestre tuvieron menor porcentaje de aciertos en comparación del primer grupo y al aplicar el instrumento se notaron más nerviosos. Los estudiantes de este grupo recuerdan bien los temas de la traza de una matriz, eigenvalores, la definición de una matriz inversa, definición de subespacio vectorial y definición del producto interno canónico; en cambio, a los estudiantes se les complicó la definición de una matriz hermítica, en qué consiste el proceso de Gram-Schmidt y en qué consiste el operador lineal. La mayor parte del grupo tuvo el mismo número de aciertos.



Figura 3. Porcentaje de aciertos del segundo en Álgebra Lineal Avanzada.

En la Figura 4 se puede observar que el porcentaje de los aciertos que obtuvo el primer grupo en la unidad de Programación Orientada a Objetos fue del 70%. Los estudiantes de este grupo no recuerdan bien algunos conceptos básicos, como lo es la herramienta de bucle *for* y la ventaja de este tipo de lenguaje de programación; sin embargo, los estudiantes recuerdan bien el cómo declarar una variable y el objetivo principal que tiene este tipo de lenguaje de programación.

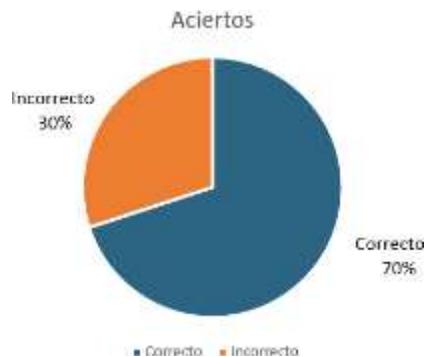


Figura 4. Porcentaje de aciertos del primer grupo en Programación Orientada a Objetos.

En la Figura 5 se puede observar que el porcentaje de los aciertos que obtuvo el segundo grupo en la unidad de Programación Orientada a Objetos fue del 57.54%. Se puede ver que, en comparación a los estudiantes de sexto semestre, obtuvieron un porcentaje más bajo y se les notó con más nerviosismo. Los estudiantes presentan dificultades en reconocer qué es una clase en Python, en identificar algunas bibliotecas principales y en distinguir las aplicaciones que tiene dicho lenguaje.

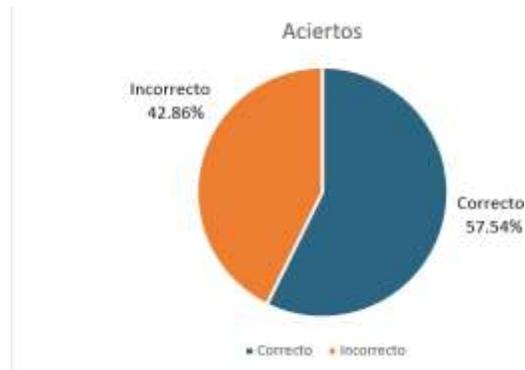


Figura 5. Porcentaje de aciertos del segundo grupo en Programación Orientada a Objetos.

En la Figura 6 se muestra el porcentaje de aciertos promedio que el primer grupo presentó al responder cada pregunta en la unidad de Cálculo Integral fue del 68%. Se puede ver que los estudiantes de este grupo recuerdan bien los temas del Teorema Fundamental del Cálculo, la convergencia de sucesiones, las características de la función seno y las propiedades de la integral; en cambio, a los estudiantes se les complicó la definición de la tangente inversa, el Teorema del Valor Medio y las formas indeterminadas de límites. La mayor parte del grupo tuvo arriba de cinco aciertos.

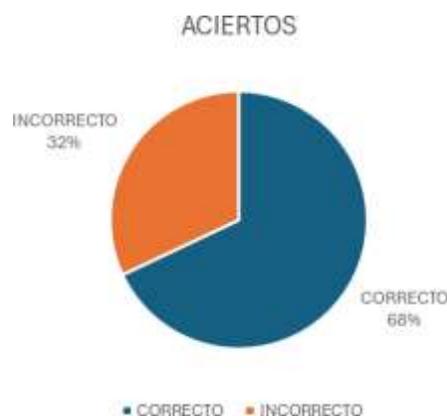


Figura 6. Porcentaje de aciertos del primer grupo en Cálculo Integral.

En la Figura 7 se muestra el porcentaje de aciertos promedio que el segundo grupo presentó al responder cada pregunta en la unidad de Cálculo Integral fue del 58%.

Se puede observar que los estudiantes del primer grupo tuvieron un mayor porcentaje de aciertos con respecto a los del segundo grupo, además éstos últimos se mostraron más nerviosos e indecisos durante la aplicación del instrumento.



Figura 7. Porcentaje de aciertos del segundo grupo en Cálculo Integral.

A continuación, se presentan algunas imágenes de las hojas que los estudiantes utilizaron para responder las preguntas: ¿Cómo te sentiste durante la prueba? ¿Cómo te sentiste con tus resultados? (Figuras 8 y 9).

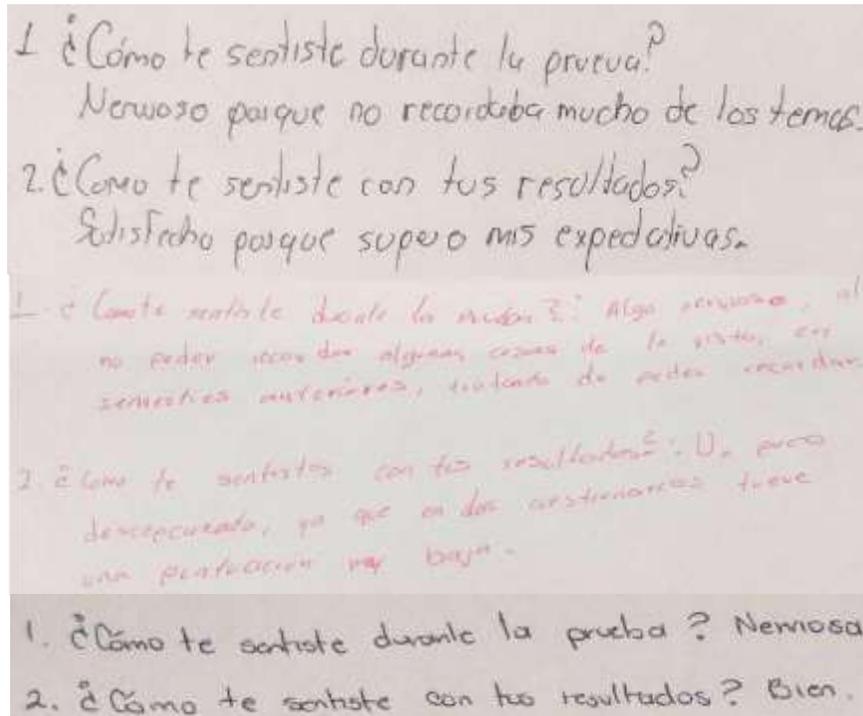


Figura 8. Imágenes de respuestas proporcionadas por estudiantes.

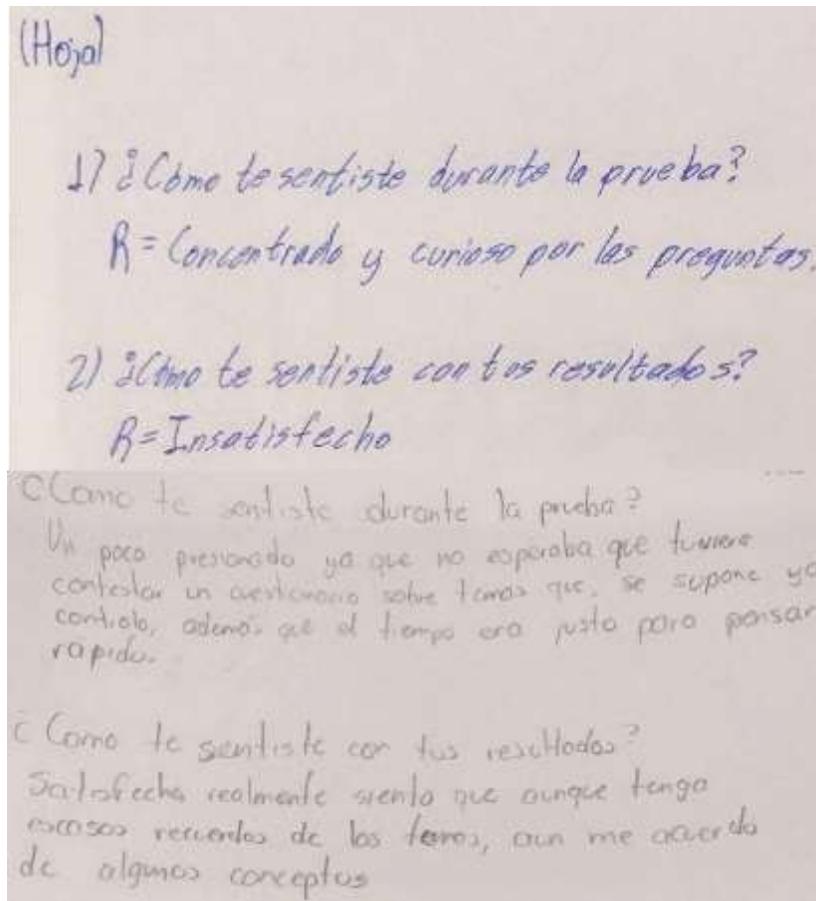


Figura 9. Imágenes de respuestas proporcionadas por estudiantes.

En estas imágenes se puede observar que los estudiantes admitieron sentirse nerviosos o presionados durante la prueba. La mayoría expresó que reconocía la necesidad de repasar algunos de los conceptos tratados en el instrumento, pues ya no los dominaban. Al mismo tiempo que los estudiantes se mostraron divididos en cuanto a la percepción de sus resultados, algunos exteriorizan satisfacción mientras que otros no estaban tan complacidos, revelando que los evaluados tenían cierto interés por la prueba, a pesar de que la misma no les representaba algún valor académico.

5. CONCLUSIONES

En los resultados se observa que los estudiantes del sexto semestre exhibieron un desempeño superior en comparación con los del octavo semestre; ya que los primeros recordaron mayor número de conceptos matemáticos, del tercer semestre. Esto puede atribuirse al tiempo transcurrido entre los semestres, quizá una ventaja en la prueba. Además, es notable que algunos estudiantes del octavo semestre mostraron signos de nerviosismo durante la evaluación, lo que podría haber afectado ligeramente su rendimiento. Este hallazgo subraya la importancia de actualizar y revisar continuamente los conocimientos, así como de manejar el estrés y la ansiedad durante las evaluaciones para lograr un rendimiento óptimo, al respecto, el instrumento de evaluación presentado en este trabajo permite a los profesores evaluar los conocimientos de matemáticas a nivel Licenciatura de sus alumnos, mientras que a éstos últimos les puede servir para autoevaluarse y, en su caso, fortalecer sus aprendizajes.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Quizizz | Free Online Quizzes, Lessons, Activities and Homework. (s. f.). <https://quizizz.com/?lng=es-ES>

Lipschutz, S.(1992). Algebra lineal (2da ed.). McGraw-Hill Interamericana.

Leon, E. (2015). Programación Orientada a Objetos (POO). www.academia.edu. Recuperado de https://www.academia.edu/11537928/Libro_programacion_orientada_a_objetos_POO_

Stewart, J. (2012) Cálculo de una variable. Trascendentes tempranas. Séptima edición. CENGAGE Learning.