



Año 3, N°1

ENERO-JUNIO 2026



JOCYTEC

Jóvenes en la Ciencia y la Tecnología

Revista de divulgación científica y tecnológica multidisciplinaria

CIENCIA INNOVACIÓN FUTURO

Conoce, aprende
e inspírate.



INVESTIGACIÓN
QUE TRANSFORMA



TECNOLOGÍA
QUE CONECTA



SOLUCIONES
PARA UN MEJOR
MAÑANA



MENTES JÓVENES
CREANDO EL
FUTURO



FORMAMOS IDEAS. IMPULSAMOS TALENTOS. CONSTRUIMOS FUTURO.



ISSN 3061-7448

**FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS,
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

Información legal

“JOCYTEC”, Jóvenes en la Ciencia y la Tecnología. Revista de divulgación científica y tecnológica multidisciplinaria, Año 3, número 1, enero-junio 2026, 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>, jocytec.editor@uatx.mx, Editor responsable, Dra. Shirley Carro Sánchez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-061312031700-102, ISSN: 3061-7448, ambos otorgados 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, 30 de junio de 2026.

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 3, NO. 1
2026, MÉXICO

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 está postulados simultáneamente en otras revistas u órganos editoriales

**REVISTA
JOCYTEC**

**AÑO 3, NO. 1
2026, MÉXICO**

JOCYTEC
Año 3, No. 1
Enero-Junio 2026
CONTENIDO

NANOENCAPSULACIÓN DE GLIBENCLAMIDA CON QUITOSANO.	1
NANOENCAPSULATION OF GLIBENCLAMIDE WITH CHITOSAN. Mayte Flores-Angeles, Vannessa Ozuna-Cantú, Simón Josías Téllez-Luis, Isidro Palos-Pizarro	
EFFECTO DEL LIMONENO SOBRE LA CINÉTICA DE POLIMERIZACIÓN EN EMULSIÓN Y LAS PROPIEDADES TÉRMICAS Y MOLECULARES DEL POLI(METACRILATO DE BUTILO).	9
EFFECT OF LIMONENE ON THE KINETICS OF EMULSION POLYMERIZATION AND THE THERMAL AND MOLECULAR PROPERTIES OF POLY(BUTYL METHACRYLATE) Romeo Lizandro Dávalos-Campos, Jesús David Flores-Oyervides, Lorena Farías-Cepeda, Anilu Rubio-Ríos, Francisco Javier Enríquez-Medrano, Víctor A. Cepeda Tova	
OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ENCERADO Y ETIQUETADO EN LA INDUSTRIA DE VINOS ARTESANALES MEDIANTE EL DISEÑO DE PROTOTIPOS SEMIAUTOMÁTICOS.	24
OPTIMIZATION OF THE WAXING AND LABELING PROCESS IN THE ARTISANAL WINE INDUSTRY THROUGH THE DESIGN OF SEMI-AUTOMATIC PROTOTYPES. Ilse Alejandra Estévez – Gutiérrez, Manuel Ángel Rosales – Montiel, Antonio Soto – Núñez, María Leonor Méndez – Hernández	
ANTEPROYECTO DE ELECTRIFICACIÓN DE UN ENTORNO COMUNITARIO DENTRO DEL CONTEXTO DEL SEMINARIO DE INTEGRACIÓN DE LA PRAXIS PROFESIONAL.	33
PRELIMINARY PROJECT FOR THE ELECTRIFICATION OF A COMMUNITY SETTING WITHIN THE CONTEXT OF THE SEMINAR ON THE INTEGRATION OF PROFESSIONAL PRACTICE. Jesús Antonio Domingo-Durán, Brian Manuel González-Contreras	
PLASTIFICACIÓN INTERNA DEL ALMIDÓN POR MODIFICACIÓN QUÍMICA MEDIANTE INJERCIÓN DE GRUPOS PROVENIENTES DE GLICEROL.	46
INTERNAL PLASTICIZATION OF STARCH BY CHEMICAL MODIFICATION THROUGH THE INSERTION OF GROUPS DERIVED FROM GLYCEROL. Arelly Navarro-Balderrabano, Pedro Raymundo García-Morán, Shirley Carro-Sánchez, Karina del Ángel-Sánchez	

NANOENCAPSULACIÓN DE GLIBENCLAMIDA CON QUITOSANO.

NANOENCAPSULATION OF GLIBENCLAMIDE WITH CHITOSAN.

Mayte Flores-Angeles, Vannessa Ozuna-Cantú, Simón Josías Téllez-Luis, Isidro Palos-Pizarro*.

Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa Rodhe, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Reynosa Tamaulipas 88779, México.

* isi_palos@hotmail.com

Recibido: 07-Mayo-2026

Aceptado: 29-Mayo-2026

RESUMEN

Cada día se desarrollan nuevas metodologías en el área de la salud para el tratamiento de diversas enfermedades; el uso de la nanotecnología ha contribuido de manera significativa en la síntesis de compuestos empleados para la liberación controlada de fármacos. En el presente trabajo se estudió la síntesis de nanopartículas de Glibenclamida empleando la técnica de emulsión-evaporación disolvente, la cual resultó ser efectiva para la formación de nanopartículas de glibenclamida con quitosano entre 45 y 94 nm aproximadamente al utilizar concentraciones de 25, 50 y 100 mg de quitosano y alcohol polivinílico (PVA).

Palabras Clave: Diabetes, Glibenclamida, Nanoencapsulación.

ABSTRACT

Every day, new methodologies are developed in the health field for the treatment of various diseases; the use of nanotechnology has contributed significantly to the synthesis of compounds used for the controlled release of drugs. In this work, the synthesis of glibenclamide nanoparticles were studied using the solvent emulsion-evaporation technique, which proved effective for the formation of glibenclamide nanoparticles with chitosan between approximately 45 and 94 nm when using concentrations of 25, 50, and 100 mg of chitosan and polyvinyl alcohol (PVA).

Keywords: Diabetes, Glibenclamide, Nanoencapsulation.

1. INTRODUCCIÓN

La nanotecnología ha tenido un impacto muy significativo en el desarrollo de fármacos, así como en los métodos de su administración. Una de las aplicaciones potenciales para los sistemas dispersos nanoparticulados es su uso como vectores coloidales o acarreadores de entidades químicas con actividad biológica (Kreuter, 1994). En la farmacología el uso de la nanotecnología, utilizando materiales poliméricos es de gran relevancia debido a que los polímeros, en particular los biodegradables, pueden contener los compuestos activos con gran estabilidad; la morfología y el tamaño confieren propiedades diferentes a los materiales con mayores tamaños de partículas

(Chávez y col., 2002), en cuanto al tamaño empleado, el uso de nanopartículas ha demostrado que son más eficientes en cuanto a su absorción y ayudan a una eficiente administración.

Algunos investigadores han demostrado que, en una terapia, el uso de nanopartículas cargadas con medicamentos resulta más efectiva que cuando se utilizan medicamentos en forma tradicional (Peng y col., 2008), esto se logra encapsulando el principio activo con materiales poliméricos biodegradables, para su liberación controlada (Young y col., 2008; Dharmala y col., 2008).

Los nanomateriales se caracterizan por aportar mejoras en las propiedades fisicoquímicas de algunos compuestos, como la resistencia, aumento de los módulos de elasticidad, fuerza y resistencia al calor, disminución de la permeabilidad a los gases y a la inflamabilidad; su tamaño oscila entre 1 y 100 nanómetros. Dentro de sus aplicaciones, se conocen aquellas en los campos de catálisis, óptica, electrónica y la biomedicina (Joudeh y col., 2022)

Las nanopartículas poliméricas son sistemas que muestran un mayor grado de innovación y versatilidad. Estos sistemas se pueden presentar en forma de nanopartículas sólidas elaboradas a partir de un polímero biodegradable o bien, en forma de nanocápsulas (Caseri, 2006). El Quitosano es uno de los polímeros que comúnmente es utilizado para sintetizar nanocompuestos con aplicaciones como acarreadores de fármacos. El quitosano, es un polisacárido de origen natural (procedente de la quitina). Es un polímero hidrofílico, biodegradable y biocompatible, compuesto de cadenas distribuidas aleatoriamente de D-glucosamina (unidades desacetiladas) y N-acetil-D-glucosamina (unidad acetilada) (Morais, 2026). La presencia de un grupo amino en la estructura del quitosano hace posible sintetizar diversos derivados que son de gran interés (Losa y col., 1991; Chávez y col., 2002), especialmente en el campo de la biomedicina, debido a que no presentan limitaciones en cuanto a biocompatibilidad, biodegradabilidad y toxicidad, además de ser naturalmente abundantes y renovables. (Il'ina y col., 2007). Algunos estudios han comprobado la capacidad de este polímero en el desarrollo de nanocápsulas para la liberación controlada de insulina (Harish y col., 2002; Lin y col., 2007).

Otros materiales utilizados en la nanoencapsulación son copolímeros, como el ácido poli (láctico-co-glicólico) (PLGA), es un copolímero biodegradable y biocompatible, ideal para ser usado en los sistemas de liberación controlada, se sintetiza por medio de la copolimerización por apertura de anillo de dos diferentes monómeros, los dímeros cíclicos (1,4-dioxano-2,5-diones) de glicerol y ácido láctico (Niu y col., 2008).

Es ampliamente usado en formulaciones en el sector farmacéutico como un sustituable de matriz para las nanopartículas en el sistema de entrega debido a su facilidad de preparación, versatilidad, biocompatibilidad, y su degradación ambiental. Además, este polímero es capaz de atravesar la barrera endosómica y entregar a los agentes terapéuticos encapsulados en el citoplasma, debido a esto, el PLGA ha sido aprobado por la FDA para su uso en numerosas aplicaciones clínicas (Denkbas y Ottenbrite, 2006).

El objetivo de este trabajo fue la nanoencapsulación de glibenclamida con quitosano, utilizando un método de emulsión.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

REACTIVOS

Se utilizaron cloroformo, ácido acético y ácido clorhídrico marca Sigma Aldrich®, polivinilalcohol marca Sigma Aldrich® con peso molecular medio, metanol grado HPLC marca Jalmek®, así como

estándar de Gliburida (200 mg). Lote F-2 (29550F2) Cat. No. 29550. Grado de pureza 100% (glibenclamida). Quitosano de peso molecular medio también Sigma Aldrich®

METODOLOGIA

Técnica de emulsión evaporación- solvente

La técnica de emulsión evaporación-disolvente que se realizó fue con base en la técnica establecida por Pen y col. (2008).

Encapsulación de glibenclamida en nanopartículas de quitosano.

Para la elaboración de las nanopartículas se preparó una solución formada de 0.030 g de glibenclamida (GLI) y 3 ml de cloroformo (solución 1). Después se preparó una segunda solución formada de 0.050 g de quitosano y se le agregó 1 ml de ácido acético al 1 %. Después se agregó la solución 1 a la solución 2, se mezcló mediante agitación y se colocó en un sonicador (Sonicador Branson Ultrasonic Corporation 3510) durante 1min. a 80 W. Se formó una emulsión a la cual se le agregaron 3 ml de PVA al 1% y se mezcló con el agitador (por 60 segundos).

La emulsión se colocó en el sonicador nuevamente durante 1 min a 80 W, y posteriormente se le agregaron 50 ml de PVA al 0.3 % y se mezcló con el agitador magnético hasta evaporar todo el solvente. La emulsión se centrifugó durante 20 min. a 13,500 rpm y a 4 °C (en una Centrifuga refrigerada de alta velocidad, Modelo VE-16KER). Por medio de decantado se separaron las nanopartículas del resto del PVA. El precipitado (nanopartículas) se re-disolvió en 3 ml de agua destilada fría y se centrifugaron nuevamente por 20 min. a 13,500 rpm a 4°C para retirar los sobrantes de PVA. Las nanopartículas obtenidas se colocaron en frascos de vidrio para ser liofilizadas (en un Liofilizador 7753022 LABCONCO) y posteriormente ser caracterizadas.

Para el diseño de experimento, se utilizaron como variables la concentración del quitosano, la concentración de la glibenclamida y la del PVA como se muestra en la tabla 1. Para optimizar las condiciones de síntesis, se implementó un diseño factorial completo de tres factores. Las variables estudiadas fueron la concentración del quitosano (25, 50 y 100 mg), la concentración del PVA (0.1, 0.3 y 0.6 %) y la concentración de glibenclamida (15 y 30 mg).

Caracterización.

La caracterización fue llevada a cabo utilizando las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), con un equipo Microscopio Electrónico de Barrido Marca JEOL® 6010 Plus. Y las mediciones cromatográficas se realizaron mediante un Cromatógrafo de Líquidos marca Agilent® Modelo 1200.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se llevó a cabo la síntesis de nanopartículas de glibenclamida con quitosano.

Los rendimientos obtenidos fueron alrededor del 10 al 12 %. Esto concuerda con lo reportado al variar concentraciones de polímero con el activo, y donde además se utilizó PVA para estabilizar las partículas de acuerdo con lo mencionado por Chávez y col. (2002).

En la tabla 1, se puede observar que a concentraciones bajas (de 15 mg de glibenclamida), no se lograron obtener partículas detectables por la técnica de SEM, como en los otros casos que se muestran del trabajo propuesto.

Tabla 1. Tamaño de partícula obtenido de los materiales de quitosano y glibenclamida.

El “*” representa los valores de los reactivos en cada formulación.

Quitosano (mg)	Glibenclamida (mg)			PVA (%)		Tamaño (nm)
	15	30	0.1	0.3	0.6	
25	*		*			---
50	*		*			---
100	*		*			---
25	*			*		---
50	*			*		45
100	*			*		45
25	*				*	56
50	*				*	60
100	*				*	66
25		*	*			65
50		*	*			67
100		*	*			64
25		*		*		66
50		*		*		75
100		*		*		80
25		*			*	93
50		*			*	95
100		*			*	94

La técnica aplicada, fue seleccionada comparando distintos métodos para la obtención de nanopartículas, algunos investigadores utilizaron procedimientos muy costosos y complicados, en particular la presente esta basada en la reportada por Panyam y col. (2002). Algunas modificaciones que se realizaron fue el utilizar vacío durante el proceso, en la elaboración de sus nanopartículas aplicó vacío, debido a que las partículas estarían dentro de otras micropartículas, siendo necesario que estuvieran comprimidas. Otra diferencia fue, la variación en la velocidad de centrifugación, (Hasan y Col., 2007; Kumar y col., 2007), centrifugaron las partículas a una velocidad de aprox. 42,000 g (g = aceleración gravitacional) la que no afectaba en la estructura de las partículas, solo en la compresión del sedimento. El uso de algunos reactivos novedosos y de difícil acceso como la solución organometálica de dióxido de carbono supercrítico, como los empleados por Furno y Col. (2004), en sus metodologías, los resultados obtenidos presentaron calidad similar con una el procedimiento llevado a cabo en este trabajo.

3.1 Caracterización de nanopartículas.

Se observó en el microscopio electrónico de barrido las distintas nanopartículas con variaciones en las concentraciones del quitosano, así como variación en las cantidades del principio activo (glibenclamida). En las micrografías se observan partículas de forma circular, con superficies lisas y con tamaños similares entre partículas, con un tamaño menor a 100 nm. Por lo que son consideradas nanopartículas (Figuras 1 y 2).

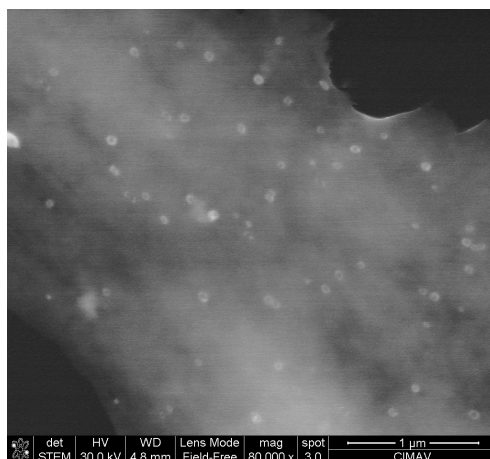


Figura 1. Nanopartículas de Glibenclamida (30 mg) y Quitosano (50 mg)

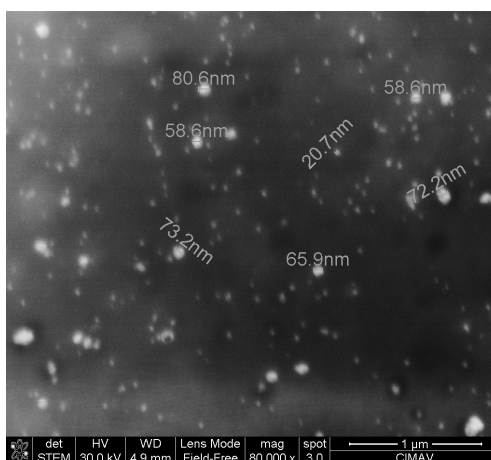


Figura 2. Nanopartículas de Glibenclamida (30 mg) y Quitosano (100 mg)

En las micrografías se puede observar los diferentes tamaños de las partículas obtenidas al encapsular la glibenclamida con el quitosano, se observan las formas y los diámetros de dichas partículas. El análisis determinó que, al incrementar la cantidad del quitosano de 50 a 100 mg, para recubrir el activo (en nuestro caso la glibenclamida que es el agente terapéutico contra la diabetes), se producen también mayor cantidad de partículas sin llega aún a los aglomerados y la formación de partículas de mayor tamaño. Se ha observado que el incremento del activo puede dejar activo sin recubrir como lo demostrado por Furno y col. (2004), quedando restos en el sobrenadante y lo cual no es conveniente para la formación de nanopartículas para liberación controlada.

3.2 Caracterización de las nanopartículas sintetizadas mediante la técnica de HPLC.

Las muestras liofilizadas de las nanopartículas, fueron filtradas y diluidas en metanol obteniendo una solución patrón de 5 mg de glibenclamida, para ser procesadas por la técnica de HPLC. Esta técnica se utilizó para la identificación de glibenclamida en las nanopartículas de quitosano. Por medio de cromatogramas, se identificó la presencia del activo (glibenclamida), el cual presentó un tiempo de retención de 9 minutos, como se muestra en el cromatograma de la Figura 3. Se analizaron las distintas muestras con las variaciones de principio activo y polímero (Figura 4).

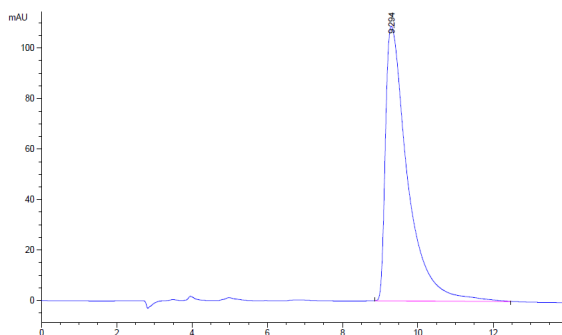


Figura 3. Cromatograma: Estándar de glibenclamida.

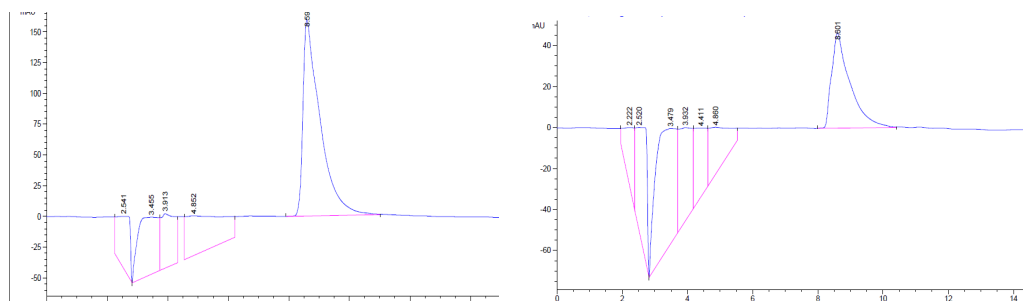


Figura 4. Cromatogramas de muestra obtenida con Quitosano (100 mg)-Glibenclamida (60 mg) (lado izquierdo), y Cromatogramas de muestra obtenida con Quitosano (100 mg)-Glibenclamida (15 mg), (lado derecho).

Con esta técnica se comprobó que las partículas formadas contienen el activo de glibenclamida y que, al estar en tamaños menores a 100 nm, la liberación puede tener un mayor control en el combate de diversas enfermedades como las crónicas degenerativas.

4. CONCLUSIONES

Las nanopartículas tienen un gran potencial para ser aplicadas en sistemas de liberación de fármacos capaces de suministrar agentes terapéuticos de manera dirigida y/o sostenida.

La técnica de emulsión- evaporación de disolvente utilizada, es efectiva para la síntesis de nanopartículas, en comparación con otras metodologías donde se utilizan condiciones supercríticas y en la presente no se utilizó vacío en la síntesis. Además, por medio del microscopio electrónico de barrido se observó la presencia de nanopartículas en las distintas combinaciones de quitosano y glibenclamida, dando un promedio de partícula menor de 100 nm.

Las combinaciones de las nanopartículas resultan apropiado debido a la versatilidad de su formulación, las propiedades de liberación sostenida, su tamaño subcelular y su biocompatibilidad con el tejido y las células hace que sean un sistema muy prometedor para cumplir este objetivo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece las facilidades otorgadas al laboratorio de Biotecnología ambiental de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, para la realización del presente trabajo. Así mismo al CIMAV por los análisis de SEM.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en la publicación de este artículo.

REFERENCIAS

Caseri, W. R. (2006). Nanocomposites of polymers and inorganic particles: preparation, structure and properties. *Materials Science and Technology*, 22(7), 807–817. <https://doi.org/10.1179/174328406X101256>.

Chávez, F., Olvera, B., Ganem, A., Quintanar, D. (2002). Liberación de sustancias lipofílicas a partir de nanocápsulas poliméricas. *Revista de la Sociedad Química de México*, 46(4), 349-356. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932002000400010&lng=es&tlng=es.

Denkbas E. B., Ottenbrite R. M. (2006). Perspectives on: Chitosan Drug Delivery Systems Based on their Geometries. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*. 21(4): 351-368. <https://doi.org/10.1177/08839115060666930>

Dharmala K., Yoo J.W., Lee C. (2008) Development of Chitosan–SLN Microparticles for chemotherapy: In vitro approach through efflux-transporter modulation. *Journal of Controlled Release*. 131(3): 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2008.07.034>.

Furno F., Morley K.S., Wong B., Sharp B.L., Arnold P.L., Howdle S.M., Bayston R., Brown P.D., Winship P.D., Reid H.J. (2004) Silver nanoparticles and polymeric medical devices: a new approach to prevention of infection? *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*. 54(6): 1019–1024. <https://doi.org/10.1093/jac/dkh478>.

Harish K.V., Kittur F.S., Tharanathan R.N. (2002). Solid state structure of chitosan prepared under different N-deacetylating conditions. *Carbohydrate Polymers*. 50 (1): 27-33. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00371-X](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00371-X).

Hasan S., Socha M., Lamprecht A., Ghazouani F.E., Sapin A., Hoffman M., Maincent P., Ubrich N. (2007) Effect of the microencapsulation of Nanoparticles on the reduction of burst release. *International Journal of Pharmaceutics*. 344(1-2): 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2007.05.066>.

Il'ina, A.V., Varlamov, V.P. (2007) Galactosylated derivatives of low-molecular-weight chitosan: Obtaining and properties. *Appl Biochem Microbiol*. 43: 73–77. <https://doi.org/10.1134/S0003683807010139>

Joudeh, N., Linke, D. (2022) Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. *J Nanobiotechnol.* 20 (262). <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01477-8>

Kreuter j. (1994). *Colloidal Drug Delivery Systems*. New York, NY. CRC Press.

Kumar V. V., Chandrasekar D., Ramakrishna S., Kishan V., Rao Y. M., Diwan P. V. (2007) Development and evaluation of nitrendipine loaded solid lipid nanoparticles: Influence of wax and glyceride lipids on plasma pharmacokinetics. *International Journal of Pharmaceutics.* 335(1-2):167–175. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2006.11.004>.

Lin Y.H., Chen C.T., Liang H.F., Kulkarni A.R., Lee P.W., Chen C.H., Sung H. (2007) Novel nanoparticles for oral insulin delivery via the paracellular pathway. *Nanotechnol.* 18:1–10. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/10/105102>

Losa C., Calvo P., Castro E., Vila-Jato J.L., Alonso M.J. (1991) Improvement of ocular penetration of amikacin sulphate by association to poly(butylcyanoacrylate) nanoparticles. *J Pharm Pharmacol.* 43: 548-552. <https://doi.org/10.1111/j.2042-7158.1991.tb03534.x>.

Morais, A., Lima, R., Pinto, M. M. M., Tiritan, M. E., & Fernandes, C. (2026). Chitosan Derivatives: Challenges and Opportunities in the Green and Sustainable Transition Era. *Molecules*, 31(8):1273. <https://doi.org/10.3390/molecules31081273>.

Niu L., Xu Y.C., Dai Z., Tang H.Q. (2008) Gene therapy for type 1 diabetes mellitus in rats by gastrointestinal administration of chitosan nanoparticles containing human insulin gene. *World J Gastroenterol.* 14(26): 4209-4215. <https://doi.org/10.3748/wjg.14.4209>.

Panyam J., Zhou W.Z., Prabha S., Sahoo S.K., Labhasetwar V. (2002) Rapid endo-lysosomal escape of poly(DL-lactide-co-glycolide) nanoparticles: implications for drug and gene delivery. *FASEB J.* 16(10):1217-1226. <https://doi.org/10.1096/fj.02-0088com>.

Peng H.S., Liu X.J., Lv G.X., Sun B., Kong Q.F., Zhai D.X., Wang Q., Zhao W., Wang G.Y., Wang D.D., Li H.L., Jin L.H., Kostulas N. (2008) Voriconazole into PLGA nanoparticles: Improving agglomeration and antifungal efficacy. *International Journal of Pharmaceutics.* 352(1-2):29-35. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2007.10.009>.

Young J., Hee N., Dong S., Dong K., Hyun L., Mi J., Sang N., Sung R., Sun K., Jae N. (2008) Ciprofloxacin-encapsulated poly(dl-lactide-co-glycolide) nanoparticles and its antibacterial activity. *International Journal of Pharmaceutics.* 352(1-2)317–323. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2007.11.001>

EFFECTO DEL LIMONENO SOBRE LA CINÉTICA DE POLIMERIZACIÓN EN EMULSIÓN Y LAS PROPIEDADES TÉRMICAS Y MOLECULARES DEL POLI(METACRILATO DE BUTILO)

EFFECT OF LIMONENE ON THE KINETICS OF EMULSION POLYMERIZATION AND THE THERMAL AND MOLECULAR PROPERTIES OF POLY(BUTYL METHACRYLATE)

Romeo Lizandro Dávalos-Campos¹, Jesús David Flores-Oyervides¹, Lorena Farías-Cepeda^{1*}, Anilu Rubio-Ríos¹, Francisco Javier Enríquez-Medrano², Víctor A. Cepeda Tovar

¹ Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas. Blvd. V. Carranza s/n esq. con Ing. José Cárdenas Valdés, Col. República Oriente, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.

² Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Enrique Reyna H. 140, San José de los Cerritos, C.P. 25294, Saltillo, Coahuila, México.

*Email: lorenafarias@uadec.edu.mx

Recibido:11-Mayo-2026

Aceptado: 03-Junio-2026

RESUMEN

Se estudió la copolimerización en emulsión del metacrilato de butilo (BMA) con limoneno (Lim), un monómero de origen natural derivado de terpenos, con el objetivo de evaluar el efecto de la relación BMA/Lim sobre la cinética de polimerización y las propiedades del copolímero resultante. Se sintetizaron copolímeros P(BMA-co-Lim) con relaciones BMA/Lim de 100/0, 90/10, 80/20 y 70/30 en un reactor por lotes. La cinética de polimerización se siguió mediante el método gravimétrico y el tamaño de partícula se determinó mediante dispersión dinámica de luz (DLS). La caracterización química de los copolímeros se realizó mediante espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y resonancia magnética nuclear de protón (RMN-¹H). Los pesos moleculares se determinaron mediante cromatografía de permeación en gel (GPC). Las propiedades térmicas fueron evaluadas mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA). Los resultados mostraron que al incrementar la concentración de Lim disminuyeron el porcentaje de conversión, la velocidad de polimerización (R_p), el diámetro de partícula y el peso molecular promedio en número (M_n). El análisis por RMN-¹H reveló que la incorporación de Lim a las cadenas poliméricas fue muy baja en todas las relaciones estudiadas. Lo anterior sugiere que el limoneno actúa principalmente como agente de transferencia de cadena y no como comonómero. Por otra parte, el análisis térmico mostró que la formulación P(BMA-co-Lim)80/20 presentó la mayor estabilidad térmica y T_g , asociadas a su mayor incorporación efectiva de limoneno; sin embargo, este comportamiento no fue lineal con la proporción inicial de Lim.

Palabras Clave: Biopolímero, copolimerización, limoneno, metacrilato de butilo, polimerización en emulsión.

ABSTRACT

The emulsion copolymerization of butyl methacrylate (BMA) with limonene (Lim), a natural terpene-derived monomer, was studied to evaluate the effect of the BMA/Lim ratio on the polymerization kinetics and the properties of the resulting copolymer. P(BMA-co-Lim) copolymers were synthesized with BMA/Lim ratios of 100/0, 90/10, 80/20, and 70/30 in a batch reactor. Polymerization kinetics were monitored by the gravimetric method, and particle size was determined by dynamic light scattering (DLS). Chemical characterization of the copolymers was performed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and proton nuclear magnetic resonance ($^1\text{H-NMR}$). Molecular weights were determined by gel permeation chromatography (GPC). Thermal properties were evaluated by differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA). Results showed that increasing the Lim concentration decreased the conversion percentage, the polymerization rate (R_p), the particle diameter, and the number-average molecular weight (M_n). $^1\text{H-NMR}$ analysis revealed that the incorporation of Lim into the polymer chains was very low across all studied ratios, suggesting that limonene acts primarily as a chain transfer agent rather than as a comonomer. Furthermore, thermal analysis showed that the P(BMA-co-Lim)80/20 formulation exhibited the highest thermal stability and T_g , associated with its greater effective incorporation of limonene; however, this behavior was not linearly related to the initial Lim proportion.

Keywords: Biopolymer, butyl methacrylate, copolymerization, emulsion polymerization, limonene.

1. INTRODUCCIÓN

La producción global de plásticos ha crecido de manera exponencial en las últimas décadas, pasando de 2 toneladas métricas (Mt) en 1950 a más de 415 Mt en 2023, con proyecciones que anticipan casi triplicar esta cifra para 2060 (Geyer y col., 2017; Rhodes, 2018). Se estima que hasta 2015 se generaron 6.300 Mt de desechos plásticos, de los cuales únicamente el 9% fue reciclado, el 12% incinerado y el 79% acumulado en vertederos o en el medio ambiente (Geyer y col., 2017). Ante esta problemática, el desarrollo de biopolímeros representa una alternativa viable para reducir el impacto ambiental asociado al uso de monómeros de origen sintético. Los biopolímeros son polímeros producidos a partir de fuentes naturales, como materiales biológicos u organismos vivos, y ofrecen ventajas como el uso de materias primas renovables, la compatibilidad ambiental y la biodegradabilidad (Kaplan, 1998). En este contexto, la polimerización en emulsión destaca como un proceso ambientalmente favorable para la producción de dispersiones poliméricas acuosas, y el uso de monómeros de origen biológico en estas formulaciones ha cobrado un interés creciente en los últimos años (Rigo y col., 2023; Mohebbi y col., 2025).

Entre los monómeros de origen natural, los terpenos han sido ampliamente estudiados como candidatos para la síntesis de biopolímeros. Los terpenos son hidrocarburos que contienen uno o más dobles enlaces y una unidad de isopreno en su estructura molecular, y son abundantes y de bajo costo (Wilbon y col., 2012). Entre ellos, el limoneno (Lim) destaca por su alta disponibilidad como subproducto de la industria cítrica y por presentar dos dobles enlaces en su estructura, lo que permite su polimerización. Sin embargo, la presencia de carbonos alílicos en su estructura lo

hace particularmente susceptible a reacciones de transferencia de cadena durante la polimerización radicalica, lo que limita su incorporación como comonomero y reduce los pesos moleculares obtenidos (Bertão y Vieira, 2026). Por esta razón, su uso en sistemas de copolimerización en emulsión con monómeros acrílicos representa una estrategia para incorporar fracciones de origen renovable en cadenas poliméricas con mejores propiedades fisicoquímicas (Rigo y col., 2023).

La polimerización en emulsión es una técnica heterogénea que utiliza agua como medio de dispersión, en la cual se polimerizan monómeros vía radicales libres en presencia de un surfactante y un iniciador soluble en agua (O dian, 2004). Esta técnica presenta ventajas importantes frente a otros métodos de polimerización, como el control fácil de la temperatura de reacción, la posibilidad de obtener altos pesos moleculares sin disminuir la velocidad de polimerización y el aprovechamiento directo del producto, sin necesidad de separar el solvente (Chern, 2008). El proceso transcurre en tres intervalos bien definidos: nucleación de partículas (Intervalo I), crecimiento de partículas en presencia de gotas de monómero (Intervalo II) y crecimiento de partículas en ausencia de gotas de monómero (Intervalo III) (Thickett y Gilbert, 2007). Cabe destacar que los terpenos, como el limoneno, se polimerizan predominantemente mediante procesos en emulsión, más que en procesos homogéneos en masa o en solución, precisamente para evitar las bajas velocidades de polimerización y los bajos pesos moleculares que se obtienen en estos últimos (Rigo y col., 2023).

El metacrilato de butilo (BMA) es un monómero acrílico ampliamente utilizado en polimerizaciones en emulsión debido a su facilidad de polimerización por radicales libres y a las propiedades fisicoquímicas favorables del polímero resultante (Lovell y Schork, 2020). La copolimerización de BMA con limoneno ha sido reportada previamente en sistemas de polimerización en masa (Zhang y Dubé, 2014); sin embargo, su estudio en sistemas de polimerización en emulsión es limitado, lo que representa una oportunidad para ampliar el conocimiento sobre la incorporación de monómeros de origen renovable en látex polimérico.

El objetivo del presente trabajo fue estudiar el efecto de la relación BMA/Lim sobre la cinética de la polimerización en emulsión y las propiedades químicas, moleculares y térmicas de los copolímeros P(BMA-co-Lim) obtenidos, con relaciones de 100/0, 90/10, 80/20 y 70/30.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El metacrilato de butilo (BMA, 99%) fue adquirido de Sigma-Aldrich y purificado mediante destilación al vacío antes de su uso para eliminar el inhibidor. El limoneno (Lim, 97%), el dodecilsulfato de sodio (SDS, 99%), el persulfato de potasio (KPS, 99%) y el cloroformo deuterado (CDCl_3) fueron adquiridos de Sigma-Aldrich y utilizados sin purificación adicional. El agua utilizada en todas las reacciones fue desionizada.

2.1. Purificación del metacrilato de butilo

El BMA fue purificado mediante destilación al vacío para eliminar el inhibidor (metoxihidroquinona) presente en el monómero comercial. El monómero purificado fue almacenado en refrigeración hasta su uso.

2.2. Síntesis de los copolímeros P(BMA-co-Lim) por polimerización en emulsión

Las polimerizaciones en emulsión se llevaron a cabo en un reactor de vidrio de 250 mL equipado con condensador, agitación mecánica y entrada de nitrógeno, a una temperatura de 70 °C. Se sintetizaron cuatro formulaciones con relaciones molares BMA/Lim de 100/0, 90/10, 80/20 y 70/30,

cuyas condiciones de reacción se muestran en la Tabla 1. En todos los casos se utilizó SDS como surfactante y KPS como iniciador soluble en agua. La mezcla de monómeros se añadió al reactor bajo agitación constante a 350 rpm. La reacción se llevó a cabo durante 4 horas en atmósfera de nitrógeno.

Tabla 1. Condiciones de reacción empleadas en la polimerización en emulsión de BMA/Lim.

Muestra	BMA (% mol)	Lim (% mol)	SDS (% masa)	KPS (% masa)
PBMA	100	0	1.5	0.5
P(BMA-co-Lim)90-10	90	10	1.5	0.5
P(BMA-co-Lim)80-20	80	20	1.5	0.5
P(BMA-co-Lim)70-30	70	30	1.5	0.5

2.3. Seguimiento de la cinética de polimerización

La evolución de la conversión de monómero se determinó mediante el método gravimétrico. A intervalos de tiempo definidos se tomaron alícuotas del látex, las cuales fueron secadas en horno a 70 °C durante 48 h para determinar el contenido de sólidos. La velocidad de polimerización (R_p) se calculó a partir de la derivada de la conversión respecto al tiempo. El diámetro promedio de partícula y el número de partículas (N_p) fueron determinados por dispersión dinámica de luz (DLS), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$N_p = \frac{6M_0X}{\pi\rho_p(D_i n_i)^3} \quad (1)$$

Donde M_0 es la masa inicial de monómero, X es la conversión, ρ_p es la densidad del polímero y $D_i n_i$ es el diámetro promedio de partícula.

2.4. Caracterización química

La composición química de los copolímeros se determinó mediante resonancia magnética nuclear de protón (RMN-¹H) en un espectrómetro Bruker de 400 MHz, utilizando CDCl₃ como disolvente. La relación muestra/disolvente fue de 20 mg/0.5 mL y los análisis se realizaron a temperatura ambiente, con un total de 16 escans. La caracterización estructural también se realizó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con accesorio de reflectancia total atenuada (ATR), en un espectrofotómetro Perkin Elmer Spectrum 1000. Los espectros se registraron en el intervalo de 4000 a 400 cm⁻¹.

2.5. Determinación de los pesos moleculares

Los pesos moleculares promedio en número (M_n) y la dispersidad de los copolímeros fueron determinados por cromatografía de permeación en gel (GPC) en un cromatógrafo de líquidos Hewlett-Packard serie 1100, equipado con tres columnas Ultrastayragel con tamaños de poro de 10⁶,

10^5 y 10^3 Å y un detector de índice de refracción diferencial (HP 1047A). Como fase móvil se utilizó tetrahidrofurano (THF) grado HPLC a un flujo de 1 mL/min. Los pesos moleculares fueron calculados con base en una curva de calibración elaborada a partir de 12 estándares de poliestireno en el intervalo de 580 a 6,300,000 g/mol.

2.6. Caracterización térmica

Las propiedades térmicas de los copolímeros fueron evaluadas mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA), ambos realizados en un equipo Discovery Series DSC/TGA de TA Instruments. Para el análisis de DSC, las condiciones de medición se establecieron entre -40 y 70 °C, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, tomando como referencia la curva del segundo calentamiento para determinar la temperatura de transición vítrea (Tg). El análisis de TGA se realizó de 25 a 600 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en atmósfera de nitrógeno, para determinar las temperaturas de inicio de degradación y la temperatura de degradación máxima (TD) obtenida a partir del termograma derivado (DTGA).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Cinética de polimerización en emulsión de BMA/Lim

En la Figura 1 se muestra la evolución de la conversión de monómero en función del tiempo para las polimerizaciones en emulsión de BMA/Lim con diferentes relaciones de comonómero. Se observó que al aumentar la concentración de Lim en la mezcla de monómeros, el porcentaje de conversión global de la reacción disminuyó de manera progresiva. La diferencia más notable se observó entre el homopolímero de BMA (100/0) y la relación 70/30, con una diferencia de 21.35% en los porcentajes de conversión promedio máximos obtenidos. Este comportamiento puede atribuirse a la estructura química del limoneno, que posee carbonos alílicos que favorecen las reacciones de transferencia de cadena durante la polimerización radicalica. Al aumentar la concentración de Lim, se incrementa la probabilidad de estas reacciones, es decir, que terminen la cadena en crecimiento y generen un radical alílico estabilizado por resonancia, de baja reactividad y reinicio lento, resultando en menores conversiones globales. Este fenómeno ha sido reportado previamente en sistemas de copolimerización de BMA con limoneno en masa (Zhang y Dubé, 2014) y es consistente con los efectos de transferencia de cadena alílica descritos para el limoneno en sistemas de polimerización radicalica (Bertão y Vieira, 2026).

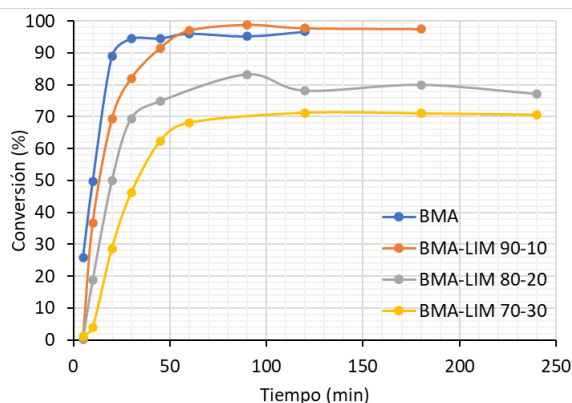


Figura 1. Evolución de la conversión en polimerizaciones en emulsión de BMA/Lim, variando la relación BMA/Lim.

En la Figura 2 se presentan los resultados de la velocidad de polimerización (R_p) obtenidos para las diferentes relaciones BMA/Lim. Se observó que conforme aumenta la concentración de limoneno, la velocidad de reacción disminuye, lo cual es consistente con el efecto de los carbonos alílicos del limoneno sobre la terminación de las cadenas poliméricas. En todas las formulaciones se obtuvo el perfil característico de la polimerización en emulsión, con un incremento inicial de la R_p correspondiente al Intervalo I de formación de partículas. El Intervalo II, en el que la R_p debe mantenerse aproximadamente constante según la teoría de Smith-Ewart, no fue claramente observable en ninguna de las formulaciones, lo cual puede atribuirse a la relativamente baja concentración inicial de monómero utilizada, una desviación ya reportada en sistemas similares (Farías-Cepeda y col., 2010).

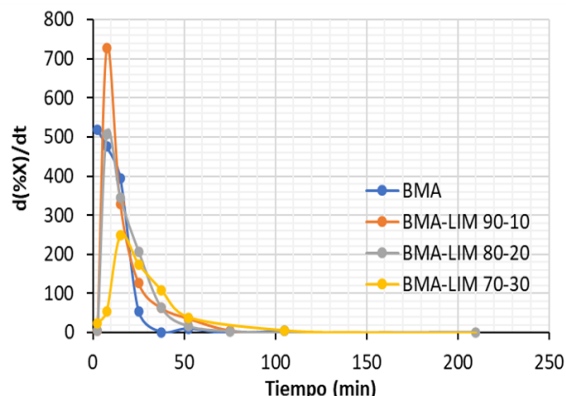


Figura 2. Evolución de la velocidad de polimerización en emulsión de BMA/Lim, variando la relación BMA/Lim.

En la Figura 3 se muestra la evolución del diámetro promedio de partícula en las diferentes polimerizaciones. Para las relaciones 100/0, 90/10 y 80/20 de BMA/Lim, los diámetros de partícula resultaron similares entre sí: 44 ± 8 , 36 ± 7 y 35 ± 7 nm, respectivamente, mientras que para la relación 70/30 se obtuvo un diámetro ligeramente menor, 30 ± 7 nm, lo cual puede relacionarse con la menor cantidad de monómero que efectivamente reaccionó en esta formulación, como consecuencia de la conversión más baja.

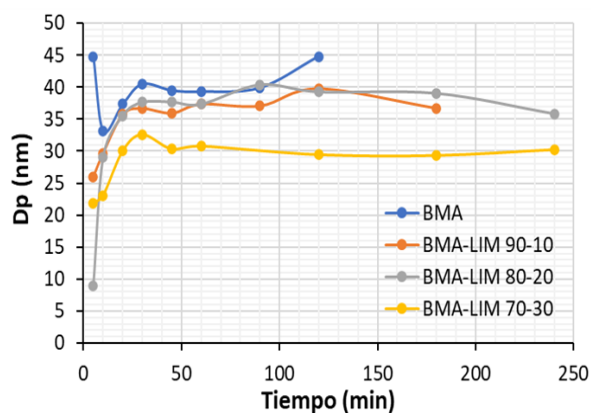


Figura 3. Evolución del diámetro promedio de partícula en polimerizaciones en emulsión de BMA/Lim, variando la relación BMA/Lim.

En la Figura 4 se muestra la evolución del número de partículas (N_p) en las distintas polimerizaciones. El mayor N_p obtenido fue de 4.82×10^{15} part/cm³ para la relación 70/30, mientras

que el menor correspondió al homopolímero de BMA, con una diferencia del 36% entre ambos valores máximos. Este resultado sugiere que la presencia de limoneno, al actuar como agente de transferencia de cadena, favorece la formación de un mayor número de cadenas de menor longitud y, en consecuencia, de un mayor número de partículas de menor tamaño.

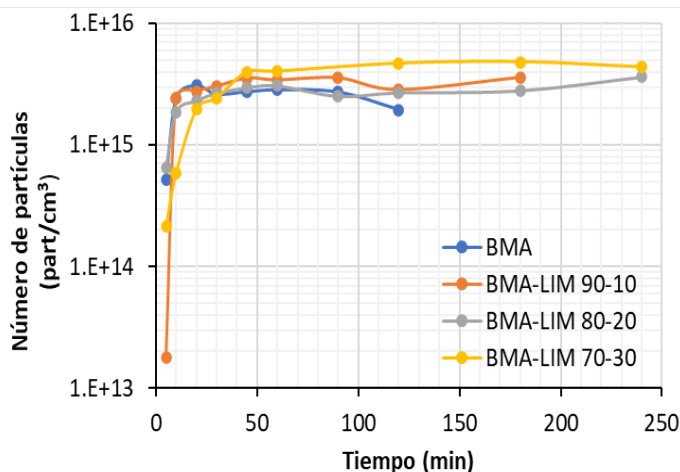


Figura 4. Evolución del número de partículas en polimerizaciones en emulsión de BMA/Lim, variando la relación BMA/Lim.

3.2. Caracterización química

La Figura 5 muestra los espectros FTIR-ATR del homopolímero PBMA y de los copolímeros P(BMA-co-Lim) (90-10, 80-20 y 70-30). En todas las formulaciones predominan las bandas características del BMA. La más representativa es la tensión del carbonilo del éster ($C=O$) a 1725 cm^{-1} , cuya permanencia y ausencia de desplazamiento en todas las muestras indican que el grupo éster del metacrilato no se ve alterado. Entre 2955 y 2850 cm^{-1} aparecen las tensiones $C-H$ asimétrica y simétrica de los grupos $-CH_3$ y $-CH_2$, comunes al BMA y al limoneno por su naturaleza alifática; en 1455 y 1380 cm^{-1} se observan las deformaciones de los grupos $-CH_2$ y $-CH_3$. En la región de la huella digital ($1060-1270\text{ cm}^{-1}$) se conservan las bandas del sistema éster ($C-O-C$ y $C-O$) en 1270 , 1190 , 1145 y 1060 cm^{-1} , lo que confirma que el esqueleto del metacrilato permanece sin modificaciones (Sarkar y Bhowmick, 2017). Los espectros de los copolímeros resultan prácticamente coincidentes con el del PBMA, sin la aparición de bandas nuevas ni desplazamientos significativos; en particular, en las regiones donde se esperarían las señales olefínicas del limoneno ($\approx 1640\text{ cm}^{-1}$, $C=C$; $800-995\text{ cm}^{-1}$, deformaciones fuera del plano $=C-H$ y $=CH_2$) no se observan bandas por encima de la intensa señal del poli(metacrilato). Esta similitud es congruente con la escasa incorporación del limoneno a la cadena, en línea con su comportamiento como agente de transferencia de cadena, como se evidencia en el estudio cinético (Figuras 1-4): el limoneno participa principalmente en la terminación de cadenas en crecimiento más que como unidad incorporada, por lo que su contribución al espectro permanece por debajo del límite de detección de la técnica.

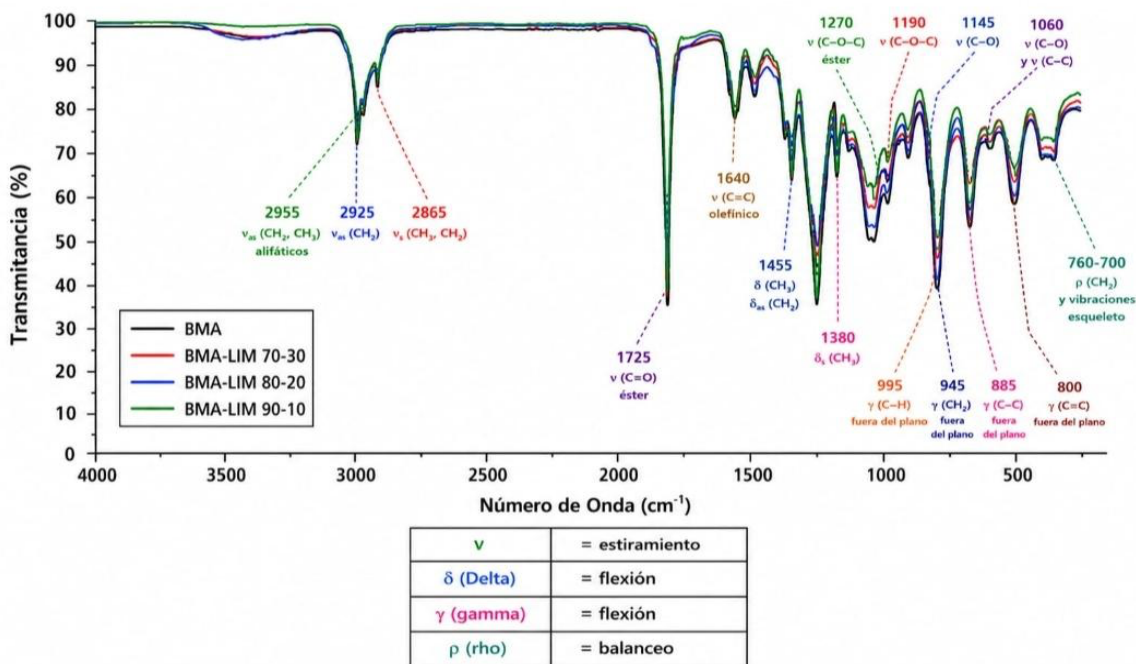


Figura 5. Espectros de FTIR del homopolímero PBMA y de los copolímeros P(BMA-co-Lim).

En la Figura 6 se presentan los espectros de RMN-¹H del PBMA y de los 3 copolímeros P(BMA-co-Lim). Para el homopolímero de PBMA se identificaron todas las señales características de su estructura, destacando la del metileno (CH₂) vecino al átomo de oxígeno, observada a aproximadamente 4.0 ppm. En los copolímeros, además de la señal en 4.0 ppm, característica del PBMA, se identificó una señal en aproximadamente 5.25 ppm, correspondiente al hidrógeno del doble enlace carbono-carbono presente en el ciclo de seis átomos de carbono de las unidades de limoneno. Con los valores de las integraciones de ambas señales descritas anteriormente se realizaron los cálculos de composición para los 3 copolímeros sintetizados.

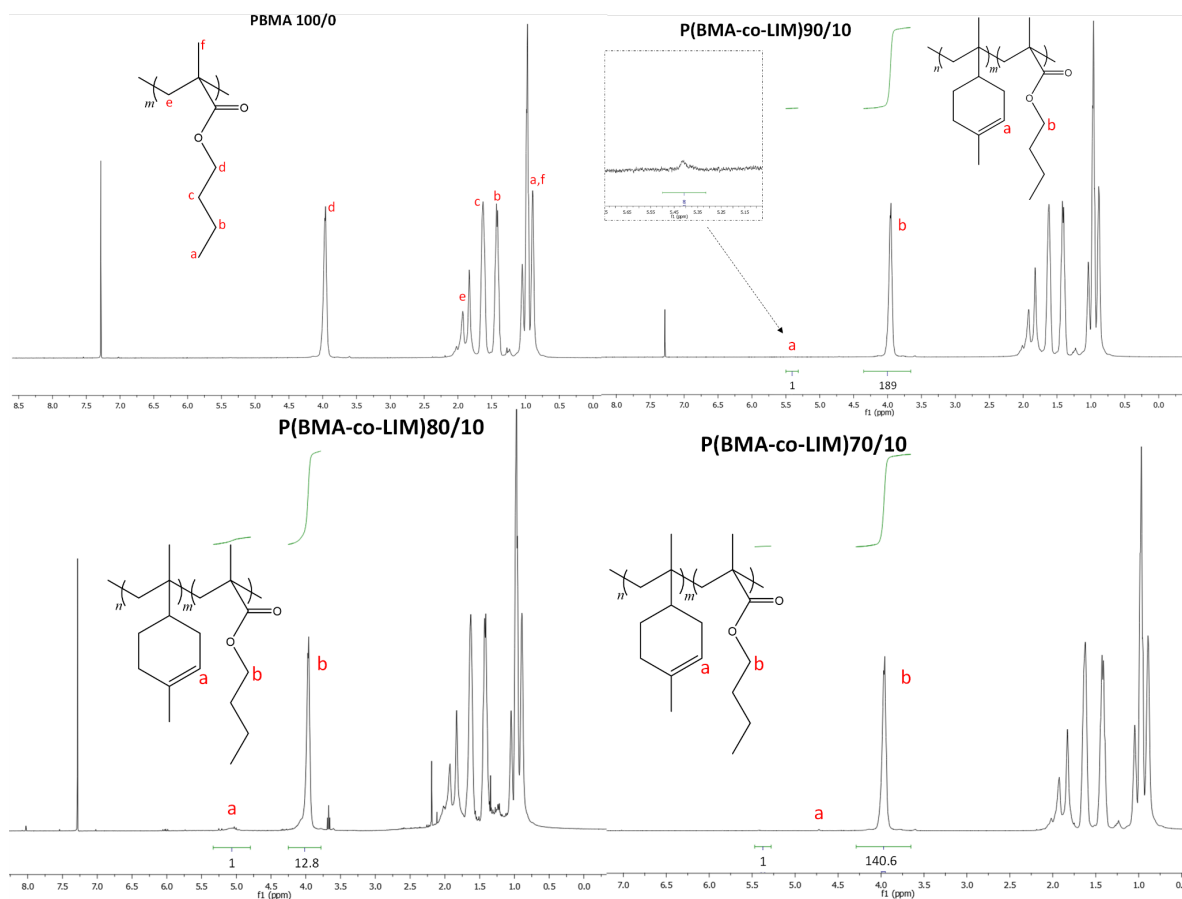


Figura 6. Espectros de RMN-¹H: a) PBMA, b) P(BMA-co-Lim)90-10, c) P(BMA-co-Lim)80-20, d) P(BMA-co-Lim)70-30.

En la Tabla 2 se muestran las composiciones en porcentaje en peso (%W) de los copolímeros determinadas mediante RMN-¹H. Se observó que la incorporación del limoneno en las cadenas poliméricas fue considerablemente baja en todas las relaciones estudiadas, siendo la relación 80/20 la que presentó el mayor porcentaje de incorporación de Lim (13 %W), mientras que las relaciones 90/10 y 70/30 mostraron incorporaciones de apenas 1.1 y 1.4 %W, respectivamente. Estos resultados indican que el limoneno no actúa predominantemente como comonómero, sino como agente de transferencia de cadena durante la polimerización en emulsión, lo cual es consistente con los efectos de transferencia alílica reportados en sistemas radicales con limoneno (Bertão y Vieira, 2026; Rigo y col., 2023).

Tabla 2. Composiciones de los copolímeros determinadas mediante RMN-¹H.

Muestra	%W BMA	%W Lim
PBMA	100	0
P(BMA-co-Lim)90-10	98.9	1.1
P(BMA-co-Lim)80-20	87.0	13.0
P(BMA-co-Lim)70-30	98.6	1.4

En la Tabla 3 se presentan los pesos moleculares promedio en número (Mn) del PBMA y de los copolímeros P(BMA-co-Lim), determinados por GPC. Se observó una disminución sistemática del Mn a medida que aumentó la concentración de limoneno en la mezcla de monómeros, pasando de 4.05×10^5 g/mol en el PBMA a 9.77×10^4 g/mol en la relación 70/30. Esta tendencia es consistente con el papel del limoneno como agente de transferencia de cadena, ya que, al interrumpir el crecimiento de las cadenas poliméricas, genera polímeros de menor peso molecular, fenómeno previamente reportado por Zhang y Dubé (2014) en sistemas de polimerización en masa de BMA-Lim.

Tabla 3. Peso molecular promedio en número (Mn) del homopolímero PBMA y de los copolímeros P(BMA-co-Lim).

Muestra	Mn (g/mol)	IPD
PBMA	4.05×10^5	3.00
P(BMA-co-Lim)90-10	1.69×10^5	3.81
P(BMA-co-Lim)80-20	1.18×10^5	1.85
P(BMA-co-Lim)70-30	9.77×10^4	2.20

Existen reportes sobre la reactividad del limoneno frente al metacrilato de butilo. Zhang y Dubé (2014) determinaron, mediante copolimerización en masa vía radicales libres a baja conversión y un método no lineal (error-in-variables), los radios de reactividad $r_1(\text{BMA}) = 6.10$ y $r_2(\text{Lim}) = 0.046$. Estos valores describen un sistema gobernado por dos consecuencias de la estructura alílica del limoneno. Por un lado, el bajo valor de r_2 y el elevado r_1 indican una pobre capacidad de propagación del limoneno, lo que predice copolímeros ricos en BMA y una incorporación limitada de limoneno; esto es consistente con las bajas composiciones de limoneno determinadas por RMN-¹H (Tabla 2). Por otro lado, esa misma estructura alílica genera radicales estabilizados que favorecen la transferencia

de cadena, un mecanismo que explica las reducciones sistemáticas observadas en la conversión, la velocidad de polimerización y el peso molecular promedio (M_n) al aumentar la fracción de limoneno (Figuras 1–4, Tabla 3). Cabe señalar que dichos radios de reactividad se determinaron mediante polimerización en masa; en este caso, nuestro sistema se encuentra en emulsión. La partición del limoneno hacia la fase acuosa reduce aún más su concentración local en el sitio de polimerización, lo que refuerza la baja incorporación observada. En conjunto, el comportamiento cinético y la composición de los copolímeros son consistentes con la reactividad del limoneno y la alta transferencia de cadena, reportadas en la literatura. En la Figura 7 se muestra el mecanismo de copoliemrización descrito.

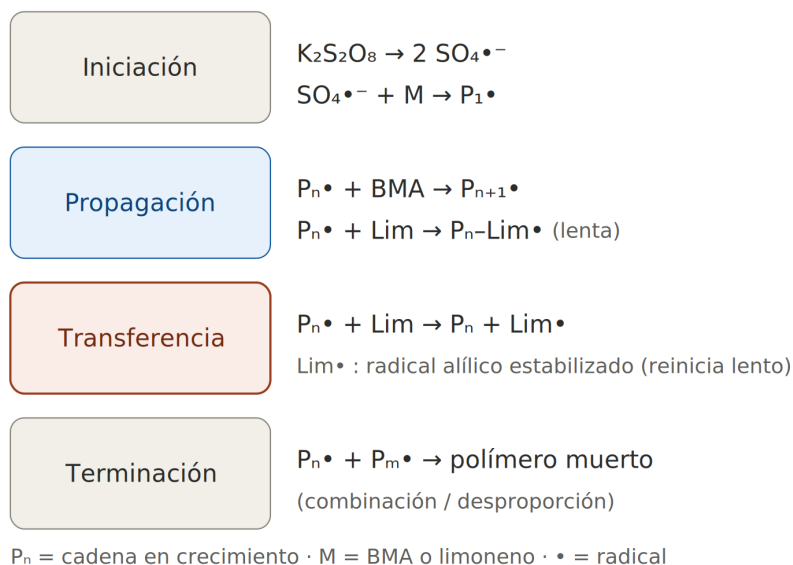


Figura 7. Esquema de reacción de la copolimerización en emulsión de BMA y limoneno.

3.3. Caracterización térmica

En la Figura 8 se presentan los termogramas de DSC para los polímeros obtenidos, y en la Tabla 4 se muestran los valores de temperatura de transición vítrea (T_g) correspondientes. Se observó que la T_g del PBMA fue de 35.9 °C, mientras que en las relaciones 90/10 y 70/30 disminuyó ligeramente a 34.6 °C y 32.6 °C, respectivamente. En contraste, la relación 80/20 presentó un incremento en la T_g hasta 42.3 °C, lo cual puede atribuirse al mayor porcentaje de incorporación de limoneno en esta formulación (13 %W según RMN- 1H), ya que la T_g del polilimoneno reportada en la literatura es de 116 °C (Singh y Kamal, 2012). Las relaciones 90/10 y 70/30, con incorporaciones de Lim menores al 2 %W, no mostraron incrementos apreciables en la T_g respecto al PBMA, lo cual es consistente con su comportamiento predominante como agente de transferencia de cadena.

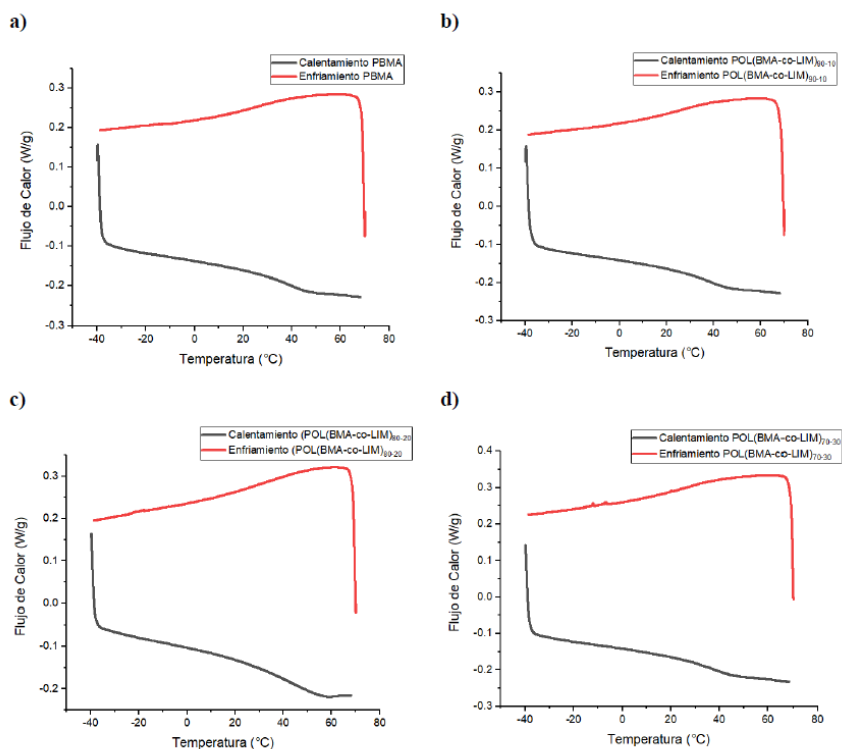


Figura 8. Termogramas de DSC: a) PBMA, b) P(BMA-co-Lim)90-10, c) P(BMA-co-Lim)80-20, d) P(BMA-co-Lim)70-30.

Tabla 4. Temperaturas de transición vítrea del homopolímero PBMA y de los copolímeros P(BMA-co-Lim).

Muestra	T _g (°C)
PBMA	35.9
P(BMA-co-Lim)90-10	34.6
P(BMA-co-Lim)80-20	42.3
P(BMA-co-Lim)70-30	32.6

En la Figura 9 se presentan los termogramas de TGA y DTGA de PBMA y los copolímeros P(BMA-co-Lim). En la Tabla 5 se muestran las temperaturas correspondientes a 10, 50 y 90% de pérdida de peso, así como la temperatura de degradación máxima (TD). Se observó que el PBMA y las relaciones 90/10 y 70/30 presentaron un proceso de degradación en una sola etapa, mientras que la relación 80/20 mostró al menos dos procesos de degradación diferenciados, lo cual puede relacionarse con el mayor contenido de limoneno incorporado en esta formulación. La estabilidad térmica no aumentó de manera lineal con la proporción inicial de limoneno en la alimentación; la formulación 80/20 presentó la mayor TD (420 °C), superior a la del PBMA (341 °C), lo cual coincide con su mayor

incorporación efectiva de limoneno determinada por RMN-¹H. En contraste, la formulación 70/30, pese a contener una mayor proporción inicial de Lim, presentó una baja incorporación, por lo que su estabilidad térmica fue menor que la de 80/20. Este resultado sugiere que la mejora térmica depende de la incorporación efectiva de limoneno en la cadena polimérica y no únicamente de la proporción inicial de limoneno alimentada.

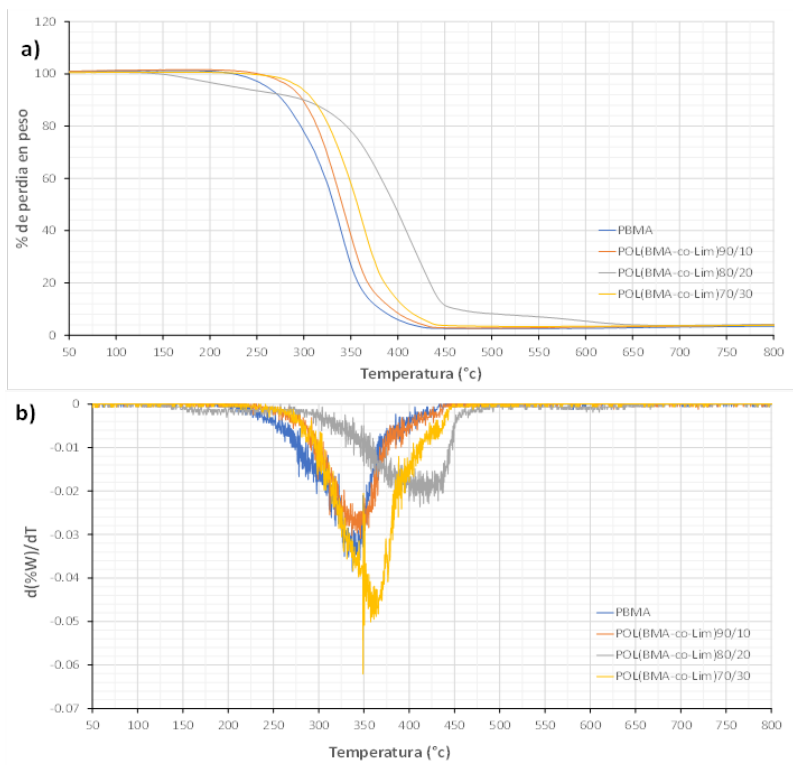


Figura 9. a) Termograma de TGA del homopolímero PBMA y de los copolímeros P(BMA-co-Lim); b) DTGA del homopolímero y de los copolímeros.

Tabla 5. Temperaturas a 10%, 50% y 90% de pérdida de peso y la temperatura de degradación máxima determinada por DTGA.

Muestra	T _{10%} (°C)	T _{50%} (°C)	T _{90%} (°C)	TD (°C)
PBMA	277	331	381	341
P(BMA-co-Lim)90/10	299	340	394	344
P(BMA-co-Lim)80/20	300	396	462	420
P(BMA-co-Lim)70/30	309	357	409	363

4. CONCLUSIONES

La polimerización en emulsión del metacrilato de butilo (BMA) con limoneno (Lim) como comonómero de origen renovable fue llevada a cabo exitosamente en relaciones de BMA/Lim de 100/0, 90/10, 80/20 y 70/30. Los resultados obtenidos demuestran que el incremento de la concentración de limoneno produce una disminución sistemática del porcentaje de conversión global, de la velocidad de polimerización (R_p), del diámetro promedio de partícula y del peso molecular promedio en número (M_n) de los copolímeros.

El análisis por RMN- 1H reveló que la incorporación de limoneno a las cadenas poliméricas fue considerablemente baja en todas las relaciones estudiadas, con valores de %W de Lim que no superaron el 13% incluso en la mayor concentración de comonómero utilizada. Este resultado, en conjunto con la disminución observada en la R_p y el M_n , permite concluir que el limoneno actúa predominantemente como agente de transferencia de cadena y no como comonómero en los sistemas de polimerización en emulsión estudiados, debido a la baja reactividad de sus carbonos alílicos.

El análisis térmico por DSC y TGA indicó que la formulación P(BMA-co-Lim)80/20 presentó el comportamiento térmico más favorable, con la temperatura de degradación máxima más alta ($T_D = 420\text{ }^\circ\text{C}$) y la T_g más alta entre los materiales evaluados ($42.3\text{ }^\circ\text{C}$). Este comportamiento coincide con la mayor incorporación efectiva de limoneno determinada por RMN- 1H . No obstante, el incremento de la estabilidad térmica no fue proporcional a la cantidad inicial de limoneno alimentada, ya que la formulación 70/30 presentó una baja incorporación de Lim y valores térmicos inferiores a los de la muestra 80/20.

Los resultados de este trabajo contribuyen al conocimiento sobre el uso de monómeros terpénicos de origen renovable en sistemas de polimerización en emulsión y representan un antecedente relevante para el diseño de estrategias que permitan aumentar la incorporación efectiva del limoneno en copolímeros acrílicos, con miras al desarrollo de materiales poliméricos más sustentables.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Bertão, M. T., & Vieira, R. P. (2026). Limonene as a renewable platform molecule: Chemical modifications and polymerization strategies toward advanced materials. *ACS Polymers Au*, 6(1), 86–106. <https://doi.org/10.1021/acspolymersau.5c00192>

Chern, C. S. (2008). *Principles and applications of emulsion polymerization*. Wiley.

de Oliveira, E. R. M., & Vieira, R. P. (2020). Synthesis and characterization of poly(limonene) by photoinduced controlled radical polymerization. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(11), 2931–2938. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01823-7>

Farías-Cepeda, L., Herrera-Ordoñez, J., & Saldívar-Guerra, E. (2010). On the kinetics and particle size polydispersity of the styrene emulsion polymerization using Aerosol MA80 and sodium dodecyl sulfate as surfactants. *Colloid and Polymer Science*, 288(14–15), 1401–1409. <https://doi.org/10.1007/s00396-010-2272-0>

- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Kaplan, D. L. (1998). Introduction to biopolymers from renewable resources. In D. L. Kaplan (Ed.), *Biopolymers from renewable resources* (pp. 1–29). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03680-8_1
- Lovell, P. A., & Schork, F. J. (2020). Fundamentals of emulsion polymerization. *Biomacromolecules*, 21(11), 4396–4441. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c00769>
- Mohebbi, S., Hutchinson, R. A., & Cunningham, M. F. (2025). Exploring bio-based monomers in emulsion and miniemulsion polymerization. *Macromolecular Rapid Communications*, 46(12), 2401097. <https://doi.org/10.1002/marc.202401097>
- Odian, G. (2004). *Principles of polymerization* (4th ed.). Wiley-Interscience.
- Rhodes, C. J. (2018). Plastic pollution and potential solutions. *Science Progress*, 101(3), 207–260. <https://doi.org/10.3184/003685018X15294876706211>
- Rigo, E., Ladmiral, V., Caillol, S., & Lacroix-Desmazes, P. (2023). Recent advances in radical polymerization of bio-based monomers in aqueous dispersed media. *RSC Sustainability*, 1(4), 788–809. <https://doi.org/10.1039/d3su00097d>
- Sarkar, P., & Bhowmick, A. K. (2017). Terpene based sustainable methacrylate copolymer series by emulsion polymerization: Synthesis and structure-property relationship. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 55(16), 2639–2649. <https://doi.org/10.1002/pola.28661>
- Singh, A., & Kamal, M. (2012). Synthesis and characterization of polylimonene: Polymer of an optically active terpene. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(2), 1456–1459. <https://doi.org/10.1002/app.36274>
- Thickett, S. C., & Gilbert, R. G. (2007). Emulsion polymerization: State of the art in kinetics and mechanisms. *Polymer*, 48(24), 6965–6991. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.09.031>
- Wilbon, P. A., Chu, F., & Tang, C. (2013). Progress in renewable polymers from natural terpenes, terpenoids, and rosin. *Macromolecular Rapid Communications*, 34(1), 8–37. <https://doi.org/10.1002/marc.201200513>
- Zhang, Y., & Dubé, M. A. (2014). Copolymerization of n-butyl methacrylate and D-limonene. *Macromolecular Reaction Engineering*, 8(12), 805–812. <https://doi.org/10.1002/mren.201400023>

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ENCERADO Y ETIQUETADO EN LA INDUSTRIA DE VINOS ARTESANALES MEDIANTE EL DISEÑO DE PROTOTIPOS SEMIAUTOMÁTICOS.

OPTIMIZATION OF THE WAXING AND LABELING PROCESS IN THE ARTISANAL WINE INDUSTRY THROUGH THE DESIGN OF SEMI-AUTOMATIC PROTOTYPES.

Ilse Alejandra Estévez – Gutiérrez*¹, Manuel Ángel Rosales – Montiel¹, Antonio Soto – Núñez¹, María Leonor Méndez – Hernández².

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, Desv. Lindero Tametate S/N La Morita, Tantoyuca, Veracruz 92100, México.

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cerro Azul, Carretera Tuxpan – Tampico Km 60, CP 92519, Cerro Azul, Veracruz, México.

*Email: ilse.estevez@itsta.edu.mx

Recibido:04-Junio-2026

Aceptado: 12-Junio-2026

RESUMEN

El presente trabajo describe la mejora del proceso de encerado y etiquetado de botellas de vino de miel de una PyME, ubicada en el municipio de Tantoyuca, Veracruz, México. Como área de oportunidad se identifica la ejecución manual de ambos procesos, generando cuellos de botella, retrabajo, desperdicio de materiales y una restricción en la capacidad de producción. Mediante el uso de herramientas de ingeniería industrial —estudio de tiempos (promedio) con cronómetro, diagrama de Ishikawa y Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF)— se diagnosticó la situación actual y se diseñaron dos prototipos: una enceradora semiautomática con control electrónico de temperatura y una etiquetadora de sistema giratorio, ambos fabricados con materiales de bajo costo. Los resultados obtenidos demuestran una mejora sustancial: el proceso de encerado pasó de 46.35 minutos para 20 botellas a 4.11 minutos para 30 botellas, y el proceso de etiquetado se redujo de 21.02 minutos para 20 botellas a 2.41 minutos para 30 botellas. La producción diaria estimada aumentó de 208 botellas a 1,930 botellas, representando un incremento en el ingreso de \$61,467.28 a \$570,623.80 por día. El proyecto demuestra el impacto positivo de la ingeniería industrial aplicada en microempresas regionales del sector artesanal.

Palabras Clave: Mejora, encerado, etiquetado, prototipo, productividad.

ABSTRACT

This paper describes the improvement of the waxing and labeling process for honey wine bottles at a small or medium-sized enterprise (SME) located in the municipality of Tantoyuca, Veracruz, Mexico. The manual execution of both processes was identified as an area of opportunity, generating bottlenecks, rework, material waste, and a constraint on production capacity. Using industrial engineering tools—time studies with a stopwatch, Ishikawa diagrams, and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)—the current situation was diagnosed, and two prototypes were designed: a semi-automatic waxing machine with electronic temperature control and a rotary

labeling system, both manufactured with low-cost materials. The results obtained demonstrate a substantial improvement: the waxing process decreased from 46.35 minutes for 20 bottles to 4.11 minutes for 30 bottles, and the labeling process was reduced from 21.02 minutes for 20 bottles to 2.41 minutes for 30 bottles. The estimated daily production increased from 208 bottles to 1,930 bottles, representing an increase in revenue from \$61,467.28 to \$570,623.80 per day. The project demonstrates the positive impact of applied industrial engineering on regional microenterprises in the artisan sector.

Keywords: Optimization, waxing, labeling, prototyping, productivity

1. INTRODUCCIÓN

La industria apícola en México representa una importante actividad económica, especialmente en regiones rurales y semiurbanas donde las microempresas artesanales son el principal motor de desarrollo local. En este contexto y considerando la importancia de la alimentación saludable, artesanal y gourmet, la producción de vino de miel o hidromiel, resulta atractiva y relevante para la población, dado que la calidad y presentación del producto son factores determinantes de competitividad en mercados nacionales e internacionales. Esto conlleva a la imperiosa necesidad de impulsar el valor agregado a través de estrategias y procesos que transformen los productos en bienes de consumo que diversifiquen los ingresos de los productores apícolas (Acosta et al., 2018) (Avila et. al., 2024), (Salgado et. al., 2023). No obstante, su potencial, la mayoría de las empresas artesanales de este sector carecen de procesos estandarizados, lo que limita su capacidad productiva y su posibilidad de atender volúmenes crecientes de demanda. La problemática identificada en una microempresa productora de vino de miel de la región huasteca veracruzana radicaba en la realización manual de las operaciones de encerado y etiquetado de botellas por parte de un único operario. Estos procesos se realizaban sin ningún control de temperatura ni guía de posicionamiento, lo que generaba alineaciones incorrectas, burbujas de aire retrabajos y tiempos de procesamiento elevados, de forma consistente con la ineficiencia reportada en otros procesos productivos no automatizados (Pineda, 2005). Esta ineficiencia operativa es un obstáculo crítico, ya que la competitividad actual en las PyMEs depende directamente de la transición de procesos manuales hacia la innovación tecnológica. El objetivo principal de este trabajo fue diseñar e implementar mecanismos que facilitaran y mejoraran dichos procesos, aplicando herramientas propias de la Ingeniería Industrial: estudio de tiempos (promedio) con cronómetro (Niebel y Freivalds, 2025), diagrama de causa-efecto de Ishikawa (Romero Bermúdez y Díaz Camacho, 2010) (Gutiérrez Pulido, 2020) y Análisis de Modo y Efecto de Fallas, AMEF (Reyes, 2007) (Villaseñor Contreras y Galindo Cota, 2020). La justificación del proyecto radica en la necesidad de que las pequeñas y medianas empresas de la región huasteca cuenten con tecnología asequible que les permita mejorar su competitividad e incrementar su producción (Vidal Rodríguez, 2007) (López-Salazar et al., 2022).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La empresa productora de vino de miel objeto de estudio inició operaciones formales en el año 2010, con una capacidad mensual de 400 litros, equivalentes a 533 botellas de 750 ml, distribuidas en las presentaciones tradicional y seco. Desde entonces ha incrementado su presencia en el mercado regional y nacional, obteniendo reconocimientos internacionales por la calidad de su producto. Opera bajo una estructura organizacional sencilla, en la que el propietario funge simultáneamente como director general y responsable del proceso productivo (Acosta et al., 2018). El proceso de producción comprende seis estaciones: esterilizado de botellas, llenado, decorado, encerado, etiquetado y almacén. Para el estudio de tiempos (promedio) se utilizó el método de

cronometraje con vuelta a cero, siguiendo la metodología de *Niebel y Freivalds (2012)*, registrando los tiempos de ciclo en cinco repeticiones por operación. El diagnóstico permitió caracterizar el proceso manual vigente; los resultados obtenidos se presenta en la sección de resultados y discusión. En la Figura 1, se muestra una imagen que muestra las etapas de encerado y etiquetado realizadas por un único operario y totalmente manuales.



Figura 1. En la imagen se logra apreciar el proceso de encerado y etiquetado, a) encerado manual y b) etiquetado de la botella de vino de miel. Fuente: Autoría propia.

El proceso de encerado consistía en introducir manualmente la boca de la botella en una olla de cera de abeja caliente, sin ningún control de temperatura, requiriendo de tres a cuatro pasadas por botella (Ver figura 1a). El etiquetado, por su parte, se realizaba colocando manualmente el rotulo en cada botella (ver figura 1b), sin ninguna guía de posicionamiento, lo que generaba alineaciones incorrectas, burbujas de aire y la necesidad de retirar y reemplazar etiquetas defectuosas. Los tiempos de ciclo registrados para ambas operaciones se presentan en la sección de resultados y discusión.

Tal como se observa en la Figura 2 y 3, se aplicó el diagrama de Ishikawa con el objetivo de identificar las causas raíz de la problemática identificada.

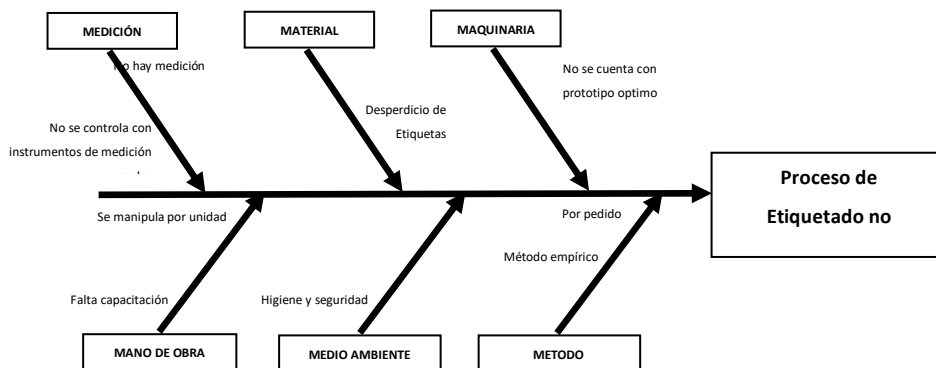


Figura 2. En la imagen se muestra el diagrama de Ishikawa analizando de manera independiente el proceso de etiquetado. Fuente: Autoría propia.

Para ello, se inspeccionó de manera independiente cada uno de los procesos involucrados: el proceso de etiquetado (Figura 2) y el proceso de encerado (Figura 3), permitiendo establecer los

factores que influyen en las deficiencias observadas en cada etapa (Romero Bermúdez y Díaz Camacho, 2010).

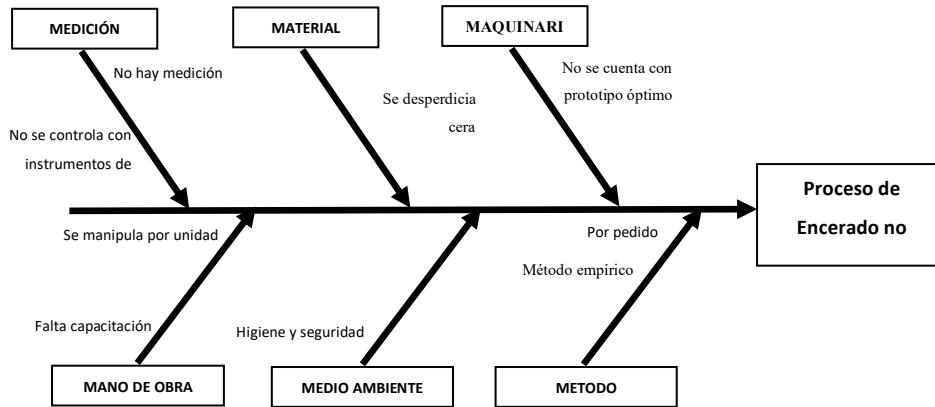


Figura 3. En la imagen se muestra el diagrama de Ishikawa analizando de manera independiente el proceso de encerado. Fuente: Autoría propia.

En ambos casos se identificaron deficiencias en las seis categorías del diagrama: maquinaria (ausencia de prototipos), material (desperdicio de cera y etiquetas), medición (ausencia de instrumentos de control de temperatura (Betancor et al., 2015), mano de obra (falta de capacitación), medio ambiente (condiciones de higiene deficientes) y método (procesos empíricos sin estandarizar). La causa raíz común fue la ausencia de mecanismos de apoyo y la falta de estandarización de las operaciones. Con base en los resultados del diagrama de Ishikawa (figura 2 y 3), se utilizó la metodología AMEF (Montalban-Loyola et al., 2015) para identificar y evaluar los posibles modos de falla presentes en el proceso de etiquetado y encerado, tal como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1.- Análisis AMEF del proceso de encerado y etiquetado. Fuente: autoría propia

Proceso	Modo de falla	Efecto	S	O	D	NPR
Etiquetado	Ubicación incorrecta de la etiqueta y recorte manual.	Mala presentación del producto y retrasos en la producción.	9	7	7	441
Encerado	Esgurrimiento y enfriamiento de la cera, generando tiempos ineficientes.	Mala presentación del producto y demoras en la producción.	9	8	7	504
Materias Primas	Deterioro de etiquetas y contaminación de la cera por almacenamiento inadecuado.	Perdida de materiales y afectación en la calidad del producto	9	7	8	504

La priorización de los riesgos se realizó mediante el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR), obtenido a partir del producto de la Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detección (D). Los principales

modos de falla identificados fueron: ubicación incorrecta de la etiqueta (NPR inicial = 441), demoras y cuellos de botella en el encerado (NPR inicial = 504) y deterioro de materias primas por almacenamiento inadecuado (NPR inicial = 504). Las acciones correctivas incluyeron el diseño de los prototipos, la capacitación del personal y la incorporación de un termostato para el control de temperatura (Betancor et al., 2015). Tras la implementación, los NPR se redujeron a 336, 392 y 336, respectivamente (Reyes, 2007). Con base en el análisis realizado, se generó una lluvia de ideas para definir el diseño óptimo de los mecanismos requeridos. El concepto de prototipo se entiende como la materialización de una idea en un objeto concreto, que permite verificar su funcionalidad antes de la producción en serie (Pinilla et al., 2011). Los diseños finales se elaboraron en el software MasterCAM.

Se muestra en la Figura 4a el prototipo de encerado el cual consiste en una estructura de madera cubierta con acero inoxidable que contiene un recipiente de 8 litros para la cera de abeja, una resistencia eléctrica de calefacción, un sistema de control de temperatura entre 60°C y 65°C mediante sensor y termostato (Betancor et al., 2015), una rejilla portabotellas con capacidad para 6 unidades simultáneas y un sistema de correderas y pistones para el desplazamiento vertical de la rejilla. El costo de materiales ascendió a \$3,862.00 pesos. En la Figura 4b, se observa el prototipo de etiquetadora que consta de una base de madera forrada con material formaica, un respaldo para el buen posicionamiento de la botella, un rodillo con soporte para el rollo de etiquetas autoadheribles, un sistema de perforaciones para colocar taquetes de nivelación que permiten adaptar el equipo a diferentes presentaciones de botella, y bordes de ángulo de color negro para guiar el desplazamiento. El costo de materiales de la etiquetadora ascendió a \$825.00 pesos.

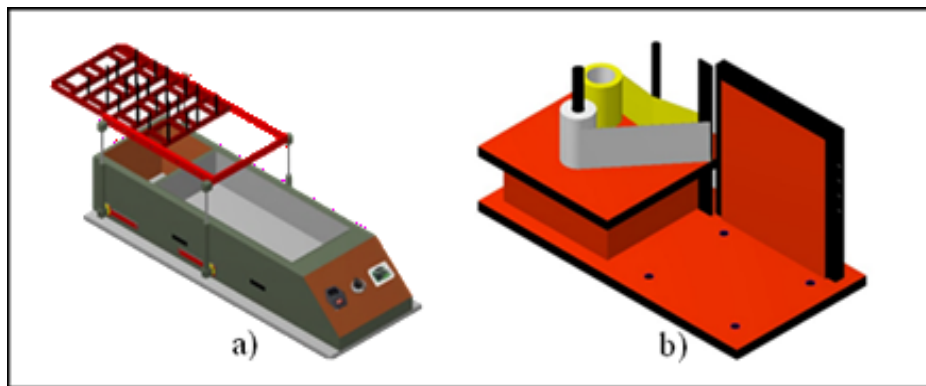


Figura 4. En la imagen se muestra a) el prototipo de encerado y b) el prototipo de etiquetado. Fuente: Autoría propia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 presenta la comparación del desempeño del proceso de encerado antes y después de la implementación del prototipo, con el objetivo de analizar el impacto de la mejora en términos de tiempo, método de trabajo y capacidad productiva. Estos hallazgos permiten discutir la efectividad del prototipo como una alternativa viable para la optimización del proceso, alineada con principios de ingeniería de métodos y mejora continua.

Tabla 2.- Comparación del desempeño del proceso productivo antes y después de la implementación de los prototipos de encerado y etiquetado. Fuente: autoría propia.

Variable de comparación	Proceso anterior (manual)	Proceso con prototipo (mejorado)
Método y operación	Encerado manual, botella por botella, alta variabilidad en el proceso	Encerado semiautomatizado mediante prototipo con ciclos de 6 botellas estandarizadas
Tiempo de operación	Mayor tiempo y sin medición estandarizada del ciclo	246.73 segundos (4.11 min) en 5 ciclos, con 49.34 s promedio por ciclo
Capacidad productiva diaria (7 h)	208 botellas por jornada	1,929 botellas por jornada
Impacto en productividad	Baja eficiencia y limitada capacidad de producción	Incremento superior al 800% en la producción diaria y mejora en eficiencia operativa

En la imagen de la Figura 5, se muestra el proceso de prueba de encerado en donde el operador realizó cinco ciclos utilizando seis botellas por ciclo, aplicando la metodología de estudio de tiempos (Niebel y Freivalds, 2012).



Figura 5. En la imagen se muestra el prototipo de encerado procesando seis botellas por ciclo. Fuente: Autoría propia.

La Tabla 3 presenta los indicadores analizados del proceso de etiquetado antes y después de la implementación del prototipo desarrollado, identificando el impacto de la propuesta tecnológica en

términos de tiempo, capacidad productiva y desempeño económico. Esta comparación hace evidente una reducción en los tiempos de operación y un incremento considerable en la cantidad de producto procesado durante la jornada laboral. Lo cual favorece la transición de un proceso manual hacia un sistema semiautomatizado, respaldando la viabilidad de la propuesta desde una perspectiva de productividad y optimización de recursos.

Tabla 3.- Reducción en los tiempos de operación y un incremento considerable en la cantidad de producto procesado durante la jornada laboral. Fuente: autoría propia.

Variable de comparación	Proceso anterior (manual)	Proceso con prototipo (mejorado)
Método de trabajo	Etiquetado manual con mayor dependencia de la habilidad del operador y variabilidad en la operación	Etiquetado mediante prototipo con ciclos estandarizados de 6 botellas
Tiempo de operación	Mayor tiempo requerido para completar el proceso de etiquetado	145 segundos (2.41 minutos) en 5 ciclos, con promedio de 29 segundos por ciclo
Capacidad productiva diaria (7 h)	208 botellas por jornada laboral	1,930 botellas por jornada laboral
Proceso completo (encerado y etiquetado)	67.37 minutos para procesar 20 botellas	6.53 minutos para procesar 30 botellas
Impacto económico	Ingreso estimado de \$61,467.28 por jornada	Ingreso estimado de \$570,623.80 por jornada
Resultado general de mejora	Proceso artesanal con baja capacidad y limitada estandarización	Incremento superior al 800% en la producción diaria y mejora en eficiencia operativa

De igual manera en la imagen de la Figura 6, se observa al operador realizando pruebas con la etiquetadora, siendo en total cinco ciclos con seis botellas por ciclo.



Figura 6. En la imagen se muestra el prototipo de etiquetadora procesando seis botellas por ciclo. Fuente: Autoría propia.

4. CONCLUSIONES

El presente proyecto demostró que la aplicación sistemática de herramientas de Ingeniería Industrial —estudio de tiempos (promedio), diagrama de Ishikawa y AMEF— en una microempresa del sector artesanal permite diagnosticar con precisión las causas raíz de la ineficiencia productiva y diseñar soluciones efectivas, de bajo costo y alta funcionalidad. Los dos prototipos fabricados —la enceradora semiautomática con control electrónico de temperatura y la etiquetadora de sistema giratorio— lograron reducir drásticamente los tiempos de procesamiento, eliminaron los retrabajos y el desperdicio de materiales, y estandarizaron las operaciones de encerado y etiquetado. La capacidad de producción se incrementó en más de 800%, pasando de 208 a 1,930 botellas procesadas diariamente en condiciones de demanda alta. El objetivo general del proyecto se cumplió al 100%. Se diseñó y mejoró el proceso de encerado y etiquetado de la empresa Apícola, aportando valor agregado al producto, mejorando su presentación y posicionando a la empresa en mejores condiciones para competir en el mercado regional y nacional. El proyecto evidencia que el conocimiento ingenieril aplicado al sector de las PYMES artesanales de la región huasteca es un detonador de competitividad y desarrollo económico local.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Ávila-Cruz, H.G., Perea-Peña, M., & Pascual-Alvarado, E. (2024) Apicultura: Diversidad más allá de la miel. *Millenaria, Ciencia y Arte*, (24), 19-22. DOI: <https://doi.org/10.35830/mcya.vi24.553>

Betancor C., Cerezo J., & Vega, A. (2006) Diseño de un sistema de control de temperatura. *Congr. TAE*, 2006, 1-9. recuperado de <https://www.asociaciontaee.org/actas/2006/papers/2006S3F04.pdf>

Gamboa-Acosta, A., Flores-Cocoletzi, A., Salas-Molina, E., Fabian-Pucheta, M. (2018). *Plan de negocios de exportación de vino de miel artesanal de Tantoyuca, Ver., con país destino a Alemania*. [Tesis de maestría, Universidad Veracruzana]. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-abierta-y-a-distancia-de-mexico/oferta-exportable/plan-de-negocios-de-exportacion-de-vino-artesanal-de-miel/22485344>

Gutiérrez-Pulido, H. (2020). *Calidad y productividad* (5.ª ed.). Ciudad de México. McGraw-Hill.

Montalbán-Loyola, E., Arenas-Bernal, E. J., Talavera-Ruz, M., & Magaña-Iglesias, R. E. (2015). Herramienta de mejora AMEF como documento vivo en un área operativa. Experiencia de aplicación en empresa proveedora para Industria Automotriz. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 2 (5), 230-240. Recuperado de URL: https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Aplicaciones_de_la_Ingenieria/vol2num5/Revista%20Aplicaciones%20de%20la%20Ingenieria%20V2%20N5_2.pdf

Niebel, B. W., & Freivalds, A. (2025). *Ingeniería industrial de Niebel. Métodos, estándares y diseño del trabajo* (14.ª ed.). Ciudad de México McGraw-Hill.

Pineda, J. A. (2005). Estudios de tiempos y movimientos en la línea de producción de pisos de granito en la Fábrica Casa Blanca S.A. Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala. Repositorio <https://biblio.ingenieria.usac.edu.gt/tesis/T7222.pdf>

Pinilla, M. A., Parra, C., y Rojas, E. (2011). El prototipo en el diseño: actitud creativa de cambio. DEARQ. *Revista de Arquitectura* 8, 18-31. Recuperado de URL: <https://www.redalyc.org/pdf/3416/341630317004.pdf>

Ponce-Talancón, H. (2007). La matriz FODA: alternativa de diagnóstico y determinación de estrategias de intervención en diversas organizaciones. *Enseñanza e Investigación en Psicología*, 12 (1), 113-130. Recuperado de URL: <https://www.redalyc.org/pdf/292/29212108.pdf>

Reyes-Aguilar, P. (2007). Análisis de Modo y Efecto de Fallas. Recuperado de URL: <https://es.scribd.com/document/308612935/Analisis-Del-Modo-y-Efecto-de-Falla>

Romero-Bermúdez, E. & Díaz-Camacho, J. (2010). El uso del diagrama causa-efecto en el análisis de casos. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos* (México), XL (3-4), 127-142. Recuperado de URL: <https://www.redalyc.org/pdf/270/27018888005.pdf>

Unión Europea. (2015). *Diccionario de términos de Cata*. Fondo Social Europeo, Tenerife, 1-72.

Vidal-Rodríguez, S. M. (2007). Estrategia Logística del Justo a Tiempo para crear ventajas competitivas en las organizaciones. *Prospectiva*, 5(1), 78-81.

Villaseñor-Contreras, A., & Galindo-Cota, E. (2020). *Manual de Lean Manufacturing: Guía básica* (2.ª ed.). Ciudad de México. Limusa.

ANTEPROYECTO DE ELECTRIFICACIÓN DE UN ENTORNO COMUNITARIO DENTRO DEL CONTEXTO DEL SEMINARIO DE INTEGRACIÓN DE LA PRAXIS PROFESIONAL.

PRELIMINARY PROJECT FOR THE ELECTRIFICATION OF A COMMUNITY SETTING WITHIN THE CONTEXT OF THE SEMINAR ON THE INTEGRATION OF PROFESSIONAL PRACTICE.

Jesús Antonio Domingo-Durán, Brian Manuel González-Contreras*.

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

*Email: brianmanuel.gonzalez@uatx.mx.

Recibido:25-Junio-2026

Aceptado: 26-Junio-2026

RESUMEN

La electrificación segura y eficiente de espacios públicos constituye un desafío técnico y social de gran relevancia, especialmente en instituciones educativas y comunitarias donde el consumo energético y la seguridad de los usuarios son críticos. Este estudio de caso presenta el trabajo desarrollado por estudiantes de sexto semestre de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, en el marco del Seminario de Integración de la Praxis Profesional. Se propone un anteproyecto enfocado en el diseño integral de instalación eléctrica para un espacio público, aplicando normativas nacionales y criterios de eficiencia energética. La metodología incluyó diagnóstico físico de las instalaciones, cálculo de cargas, selección de conductores y canalizaciones, selección de luminarias LED, implementación de circuitos independientes para cargas críticas. Los resultados proponen mejoras sustanciales en seguridad eléctrica, reducción de costos operativos y optimización del consumo energético. El anteproyecto subraya la importancia de la praxis profesional como estrategia pedagógica para formar ingenieros conscientes de su responsabilidad social, capaces de generar soluciones que impacten positivamente en la comunidad y promuevan la justicia social.

Palabras Clave: diseño eléctrico, instalación eléctrica, modelo humanista, normativa eléctrica, praxis profesional.

ABSTRACT

The safe and efficient electrification of public spaces is a major technical and social challenge, especially in educational and community institutions where energy consumption and user safety are critical. This case study presents the work carried out by sixth-semester mechanical engineering students at the Autonomous University of Tlaxcala as part of the Professional Practice Integration Seminar. A preliminary design focused on the comprehensive design of electrical installations for a public space is proposed, applying national regulations and energy efficiency criteria. The methodology included a physical assessment of the installations, load calculations, selection of conductors and conduits, selection of LED lighting fixtures, and implementation of independent

circuits for critical loads. The results suggest substantial improvements in electrical safety, reduced operating costs, and optimized energy consumption. The preliminary design underscores the importance of professional practice as a pedagogical strategy for training engineers who are aware of their social responsibility and capable of generating solutions that positively impact the community and promote social justice.

Keywords: electrical design, electrical installation, humanistic model, electrical codes, professional practice.

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la educación superior, es imprescindible conectar los conocimientos teóricos con las realidades organizacionales (Kelley & Knowles, 2016). El Seminario de Integración de la Praxis Profesional (SIPP), que es parte del plan educativo 2023 del programa educativo (PE) de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica (IM) de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx), se ha convertido en un componente clave para el aprendizaje contextual (Ramírez-Vicente, 2024). Esto permite que los estudiantes experimenten, examinen, desarrollen y adquieran conocimientos significativos dentro de situaciones reales en su ámbito profesional. Es esencial conectar a los estudiantes con el sector productivo para fomentar el aprendizaje situado en la enseñanza de la ingeniería y desarrollar las habilidades necesarias para el ejercicio profesional. Esto concuerda con el paradigma del aprendizaje situado, que une las teorías constructivistas y socioculturales, las cuales afirman que el conocimiento se construye eficazmente cuando se aplica en situaciones prácticas que, a su vez, contradice la idea de que aprender es únicamente recibir conocimientos individuales. En concreto, el concepto de *praxis profesional* impulsa en los estudiantes que, mediante la integración de la teoría y la práctica, la colaboración con los demás y la reflexión y el aprendizaje continuo, estos pueden desarrollar prácticas más eficaces y éticas que les permitan abordar mejor los complejos retos a los que se enfrentan profesionalmente (Ortiz-Ortiz & Díaz-Barriga, 2023). De esta manera, el perfil de egreso de los estudiantes de los diferentes planes de estudio de licenciatura de la UATx, se expresará en tres tipos de capacidades, articulados a través de la *praxis profesional*, como se muestra en la Figura 1 (Ortiz-Ortiz & Díaz-Barriga, 2023).

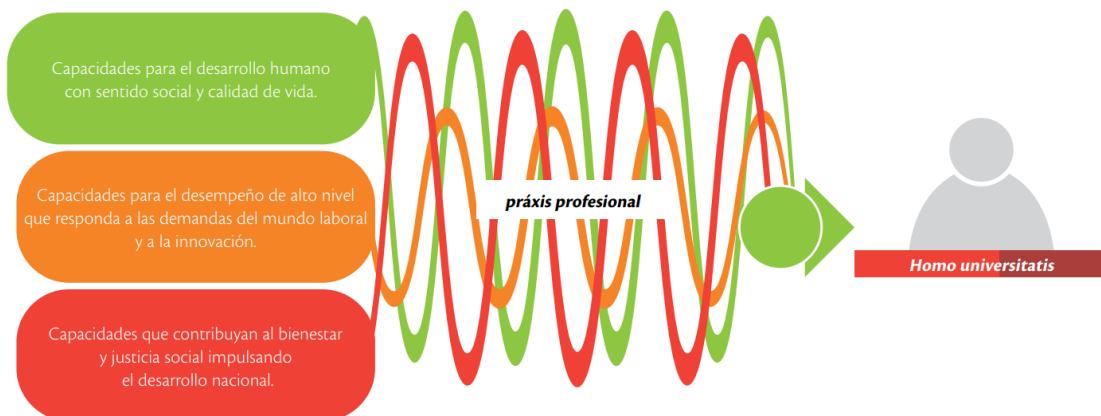


Figura 1. Las tres capacidades del perfil del egresado del MHIC a partir de la *praxis profesional* (Ortiz-Ortiz & Díaz-Barriga, 2023).

Es en este sentido que la formación de ingenieros en el siglo XXI exige no solo el dominio de conocimientos técnicos, sino también la capacidad de aplicar dichos saberes en contextos reales,

con conciencia de su impacto social y ambiental (Kelley & Knowles, 2016). En este sentido, los SIPPs constituyen un espacio académico que vincula la teoría con la práctica, permitiendo a los estudiantes enfrentar problemas auténticos de su entorno comunitario.

El presente estudio de caso se centra en el trabajo realizado por estudiantes de sexto semestre del PE de IM de la UATx, quienes desarrollaron proyectos de electrificación segura y eficiente en espacios públicos, particularmente en un Auditorio comunitario (ver Figura 2) de la comunidad de San Luis Apizaquito, en Apizaco, Tlaxcala. La electrificación de instituciones educativas representa un reto técnico y social: garantizar un suministro confiable de energía, cumplir con normativas nacionales, reducir riesgos eléctricos y optimizar el consumo energético.



Figura 2. Fachada del entorno social considerado como estudio de caso.

Los proyectos elaborados por los equipos integraron metodologías de diagnóstico, diseño y cálculo eléctrico, así como la aplicación de normas mexicanas de seguridad y eficiencia energética. Además, se enfatizó el enfoque de justicia social, entendido como la responsabilidad de los futuros ingenieros de contribuir al bienestar comunitario mediante decisiones técnicas que favorezcan la seguridad, la sostenibilidad y la equidad en el acceso a servicios básicos (Ortiz-Ortiz & Díaz-Barriga, 2023).

Este artículo presenta los resultados del proyecto elaborado dentro del SIPP de sexto semestre, analiza sus aportaciones técnicas y sociales, y reflexiona sobre el valor pedagógico de la *praxis profesional* como herramienta para formar ingenieros capaces de responder a las demandas del mundo laboral y de la sociedad en general.

1.1 El proyecto eléctrico y su importancia

La electrificación de espacios públicos, particularmente instituciones educativas, constituye un reto técnico y social de gran relevancia. Garantizar un suministro confiable de energía, cumplir con

normativas nacionales y optimizar el consumo energético son condiciones indispensables para la seguridad y el bienestar de las comunidades. El SIPP de sexto semestre de Ingeniería Mecánica en la UATx se diseñó con el propósito de vincular la teoría con la práctica, permitiendo a los estudiantes enfrentar problemas reales de su entorno (Ramírez-Vicente, 2024). En este caso, dos equipos desarrollaron proyectos de electrificación segura y eficiente en una escuela primaria de Apizaco, Tlaxcala. El enfoque del seminario no se limitó a la dimensión técnica, sino que incorporó la justicia social como eje transversal: la conciencia de que las decisiones de ingeniería impactan directamente en la seguridad, la equidad y la calidad de vida de los entornos ciudadanos de las comunidades.

En cuanto al proceso de elaboración de un proyecto eléctrico, se consideraron los elementos fundamentales que se requieren para establecerlo adecuadamente (Becerril-López, 2008; Rodríguez-Rocha, 2023), que se muestran en la Figura 3 (planos de planta, diagrama unifilar, cuadro de distribución de cargas por circuito, croquis de localización del predio en relación con las calles más cercanas, especificación de materiales y equipo por utilizar y la memoria técnica descriptiva, conforme a las Normas Oficiales Mexicanas).



Figura 3. Etapas generales del proceso de elaboración de un proyecto eléctrico.

Es importante mencionar que este proyecto de la *praxis*, al ser de sexto semestre, queda acotado a solo establecer un anteproyecto, debido a que los estudiantes llevan un curso general de instalaciones eléctricas generales en donde no se aborda con detalle aspectos como balanceo ni distribución de cargas, por ello el alcance del proyecto queda cotado a:

- Presentar un anteproyecto que incluye sólo áreas generales del espacio de estudio.
- Limitar el levantamiento de carga a aspectos cualitativos observables, sin realizar mediciones *in situ*.
- Proponer un cuadro de cargas distribuido solo en función de cargas proyectadas, sin tomar en cuenta la carga total de oficinas y otros entornos aledaños.

1.2 La importancia de la praxis profesional

En el contexto de la reforma curricular en la UATx del 2023, se programó un seminario de *praxis profesional* para cada semestre como un espacio donde el componente humanista e integrador posibilite aplicar lo aprendido en cada una de las asignaturas durante ese período para contribuir a la formación por capacidades. El propósito es que, con ello, desde el principio se forme la identidad profesional, se progrese hacia el fortalecimiento de la práctica profesional y se termine con aspectos

de investigación y retribución social desde la perspectiva personal, profesional e investigadora. Por lo tanto, se podría considerar la *praxis* como un proceso de autorrealización que implica el paso de competencias a capacidades. Se diferencia de la autorrealización en que esta última se refiere al desarrollo individual a través de ser auténtico y pleno, pero desde el hacer individual. En contraposición, la *praxis* es un modo de saber hacer y saber ser en el mundo, que no se evalúa a partir del rendimiento o la productividad. Es debido a lo anterior que el enfoque de este estudio de caso está alineado con el propósito del SIPP: aplicar conocimientos de ingeniería mecánica en un contexto socialmente relevante, garantizando seguridad, eficiencia energética y justicia social.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se aplicó una metodología fácil de seguir considerando las etapas comunes dentro del desarrollo de un proyecto eléctrico con un enfoque sistemático dividido en tres fases: diagnóstico del área, diseño y planificación, implementación y presentación. Cada fase considera las pautas aportadas por las normas que rigen en el país. Lo anterior se describe en los siguientes apartados.

2.1. Contexto normativo

El diseño, la supervisión y la ejecución de un proyecto eléctrico debe seguir las pautas establecidas por las normas vigentes, ya que, en su ausencia, no sería posible obtener proyectos eléctricos apropiados (Rodríguez-Rocha, 2023). Para que un proyecto eléctrico sea construido y aprobado por las autoridades pertinentes, debe satisfacer una serie de requisitos. En consecuencia, a continuación se enumeran las pautas fundamentales para respaldar el proyecto eléctrico, que son las mínimas exigidas para asegurar la validez de un proyecto de ingeniería.

Tabla 1. Normas mexicanas y su importancia dentro de un proyecto eléctrico.

Norma	Características y utilidad
NOM-001-SEDE-2012	La estructura de esta norma responde a las necesidades técnicas que se requieren en la utilización de las instalaciones eléctricas residenciales, comerciales o industriales, en el ámbito nacional, se respetan términos habituales para evitar confusiones en los conceptos
NOM-007-ENER-2004	Esta norma tiene como finalidad establecer niveles de eficiencia energética en términos de densidad de potencia eléctrica para alumbrado con que los que se debe de cumplir los sistemas a instalar en el uso general de edificios no residenciales ya sean nuevos, ampliaciones y modificaciones de los ya existentes con el fin de disminuir el consumo de energía eléctrica y contribuir la preservación de los recursos energéticos y la ecología de la nación.
NOM-001-STPS-2008	Esta es una norma nacional de seguridad que regula las condiciones de seguridad e higiene en todos los edificios, locales, instalaciones y áreas de los centros de trabajo, por lo que esta norma es de carácter obligatorio dentro del territorio mexicano.
NMX-J-136-ANCE-2019	El objetivo de esta norma es establecer las abreviaturas y símbolos para el diseño e interpretación de diagramas, los cuales proporcionan la información mínima necesaria que se utilizan en planos y equipos eléctricos.

En cuanto al software de diseño y dibujo asistido por computadora (CAD) se emplea AutoCAD 2025, en versión estudiantil, que permite crear y editar dibujos y modelos 2D y 3D de forma precisa.

2.2. Metodología de diseño y planeación

Cada una de las etapas seguidas para el desarrollo del anteproyecto se ilustran en la Figura 4 y se describen de la siguiente manera.



Figura 4. Pruebas de impresión para determinar los parámetros adecuados de laminación del filamento.

Para el diagnóstico del área se consideraron:

- Inspección física de las instalaciones del espacio público (auditorio/biblioteca).
- Identificación de deficiencias en iluminación, sobrecargas y riesgos eléctricos.
- Registro de consumos energéticos y análisis de demanda.
- Revisión de normativas aplicables: NOM-001-SEDE (NOM, 2012), NOM-013-ENER (NOM, 2013), NOM-007-ENER (NOM, 2014), NOM-002-STPS (STPS, 2010), NOM-029-STPS (STPS, 2011).

En cuanto al diseño y planificación, se consideraron los siguientes aspectos:

- Elaboración de planos eléctricos y cálculo de cargas.
- Dimensionamiento de conductores y canalizaciones.
- Selección de luminarias LED de alta eficiencia y sistemas de control programados.
- Propuesta de circuitos independientes para cargas críticas (iluminación, bombas, equipos especiales).

Finalmente, la implementación y presentación incluye los elementos siguientes:

- Simulación de desempeño eléctrico y luminotécnico.
- Evaluación del cumplimiento normativo y de seguridad.
- Integración de señalización fotoluminiscente y sistemas de iluminación de emergencia autónomos.

- Presentación de propuesta técnica y económica con recomendaciones de ejecución.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando todo lo anterior, las actividades desarrolladas consideraron visitas al auditorio para lograr una auditoría adecuada del entorno. Enseguida, con esa información se procedió a analizar la situación actual del entorno y así establecer soluciones energéticas apropiadas basadas en cálculos y las normas correspondientes, que derivaron en el plano eléctrico y la memoria técnica.

3.1. Resultados

La inspección física del entorno permitió la revisión de las condiciones actuales de la instalación eléctrica del auditorio, identificando cableado obsoleto, sobrecargas y deficiencias en la distribución. Las Figuras 5 y 6 muestran algunos de estos aspectos.



Figura 5. Diagnóstico realizado *in situ* por parte de los estudiantes.



Figura 6. Verificación de condiciones del local considerado como objeto de trabajo dentro del SIPP.

La ubicación del entorno analizado y revisado queda plasmada dentro del plano eléctrico a través del croquis de ubicación, el cual se muestra en la Figura 7.

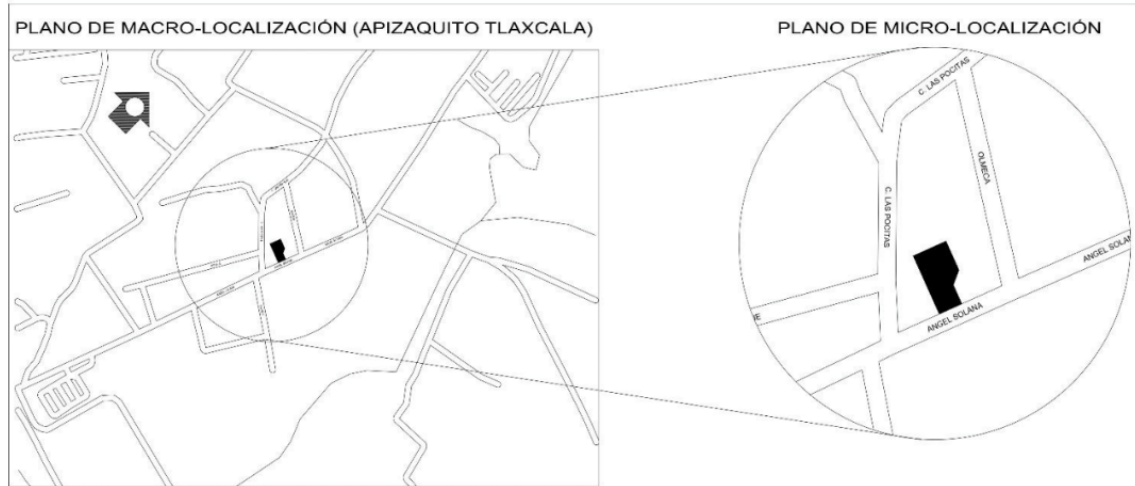


Figura 7. Croquis de ubicación considerado dentro del plano eléctrico general elaborado.

Durante estas inspecciones, también se detectaron zonas con iluminación insuficiente en pasillos, escaleras y áreas comunes, lo que representaba riesgos de seguridad. Asimismo, se registraron los niveles de demanda eléctrica, evidenciando un uso ineficiente de luminarias y equipos de refrigeración, así como que se identificaron contactos sin protección, ausencia de sistemas de puesta a tierra adecuados y falta de señalización de emergencia. De hecho, se verificó el incumplimiento parcial de normas como la NOM-001-SEDE (instalaciones eléctricas), NOM-013-ENER (iluminación exterior), NOM-007-ENER (iluminación interior) y NOM-002-STPS (protección contra incendios). Lo anterior se condensa en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados del diagnóstico del espacio revisado.

Ubicación	Elemento	Cantidad	Estado técnico observado
Acometida/Exterior	Bajada de servicio	1	Crítico: conductor descubierto sin canalización protectora; riesgo de arco eléctrico.
Sanitarios	Interruptores	2	Operación manual: falta de control automatizado para ahorro energético.
Auditorio	(Incandescentes/Halógenos)	5	Alto consumo térmico por efecto Joule y baja eficiencia lumínica.
Auditorio	Contactos (Tomacorrientes)	6	Deficiente: cajas de registro sin tapa, cableado visible y falta de placa de protección.

El levantamiento permitió establecer que el espacio público requiere una modernización integral de su infraestructura eléctrica, con énfasis en:

- a) Sustitución de luminarias por sistemas LED programables.
- b) Implementación de circuitos independientes para cargas críticas.
- c) Instalación de sistemas de puesta a tierra y protecciones termomagnéticas.
- d) Señalización fotoluminiscente y sistemas de iluminación de emergencia autónomos.

Este diagnóstico fue el punto de partida para el diseño y planificación del proyecto, asegurando que las soluciones propuestas respondieran tanto a las necesidades técnicas como a los criterios de seguridad y justicia social.

Con la información proveniente del diagnóstico se está en posición de elaborar la distribución de cargas a través del cuadro de distribución de estas. Esta información aparece en el plano general y para fines de presentación en este artículo se presenta como capturas de pantalla provenientes de ese plano. Esta distribución preliminar se basa considerando la NOM-001-SEDE-2012 (NOM-2012), artículo 220-12 y la tabla correspondiente, por lo que se sugieren 8 reflectores de 200 W tipo LED, distribuidos en el recinto de 270 m² (30 x 9 m) de área (A). Para garantizar una visibilidad óptima tanto en asambleas y eventos vecinales como en partidos recreativos de voleibol, se establece un objetivo de iluminancia (*I_{lum}*) media en el suelo de 250 Luxes. La altura disponible de montaje para los proyectores es de 5.7 m. La luminaria propuesta es la de un reflector LED Industrial de Alta Eficiencia (200 Watts), cuyo flujo luminoso nominal (*F_{nom}*) por reflector es de 24,000 lúmenes (rendimiento de 120 lm/W), con coeficiente de utilización (*CU*) de 0.50 (apropiado para proyectores en áreas abiertas) y un factor de mantenimiento (*FM*) de 0.80 (que considera la afectación por polvo en intemperie). Utilizando el método simplificado de cavidad zonal (Becerril-López, 2008; Rodríguez-Rocha, 2023) para el cálculo del número de reflectores se determinó la cantidad de ellos:

$$N = \frac{I_{lum} \times A}{F_{nom} \times CU \times FM} \quad (1)$$

Sustituyendo los valores indicados se obtiene:

$$N = \frac{250 \times 270}{24000 \times 0.5 \times 0.8} = \frac{67500}{9600} = 7.03, \quad (2)$$

que se recomienda se ajuste a un número par inmediato superior para una distribución uniforme de la luz. En cuanto al cálculo de protecciones, se emplea el factor de protección del 1.25 dictaminado por la NOM-2012 y empleando la fórmula que relaciona potencia de la carga (*P_{nom}*) con los valores nominales de voltaje según el tipo de suministro, en este caso, de 127 V (*V_{nom}*):

$$I_C = 1.25 \frac{P_{nom}}{V_{nom}}, \quad (3)$$

ecuación aplicable a la selección de conductores. En ambos casos, se selecciona el valor inmediato superior próximo a los valores de protección tipo fusible y de termomagnético, así como del conductor, de acuerdo con los artículos 240-6 y 210-18 (NOM-2012), respectivamente. Para la selección de conductores se utiliza, además, los artículos 310-15 y 314-16 de la isma (NOM-2012) así de las tablas respectivas. Para la selección de la tubería, se hizo uso de las tablas 1 y 4 del capítulo 10 de la NOM-2012. El cable calibre 12 AWG admite una capacidad de conducción continua de hasta 20 A. Por último, tomando en cuenta una longitud estimada de trayecto (*L*) de 45 m desde la base del tablero de distribución hasta el punto final o más lejano del circuito derivado (luminaria y contacto), y una resistencia estándar (*R_{km}*) para el calibre 12 AWG de 6.39 Ω/km se calcula la caída de voltaje porcentual (NOM-2012):

$$e\% = \left(\frac{1}{1000} \right) \left(2 \times \frac{P_{nom}}{V_{nom}} \times L \times R_{km} \right), \quad (4)$$

dando un 2%, lo que de acuerdo con la (NOM-2012), es adecuada.

Considerando los cálculos anteriores y que fueron aplicados a todos los conductores y protecciones de los circuitos derivados, se elabora el diagrama unifilar de la Figura 8, en donde, además, se están considerando circuitos futuros para bomba y otras cargas diversas (como la iluminación de pasillos) que los administradores del auditorio mencionaron están contemplados a corto plazo.

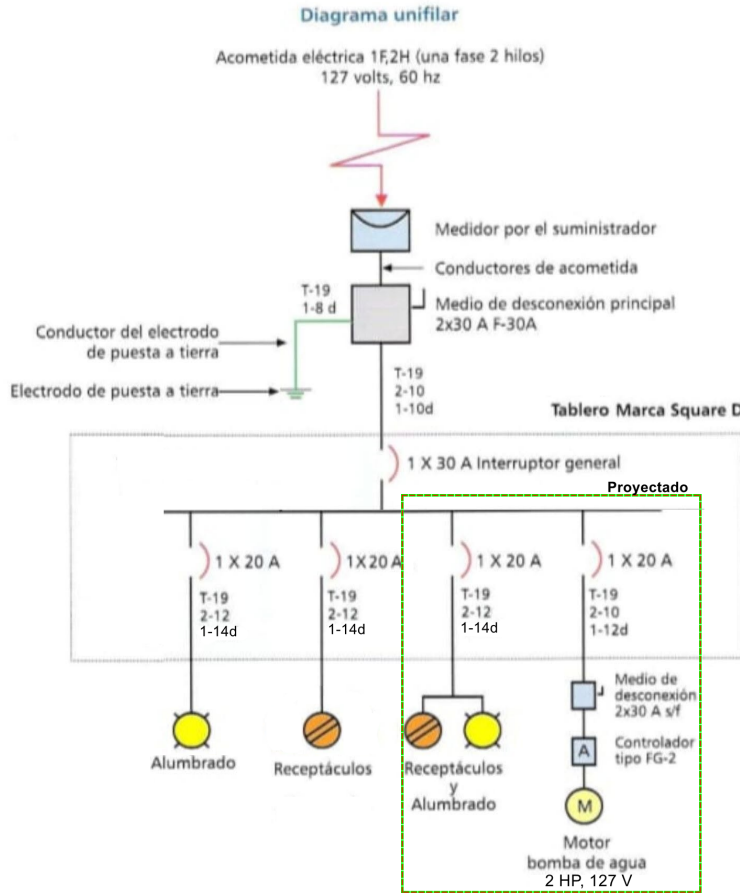


Figura 8. Diagrama unifilar de cargas considerado dentro del plano eléctrico general elaborado.

Derivado de esos mismos cálculos, se ordena la información en tablas que ilustran la distribución de cargas, generándose el cuadro de cargas que se muestra en la Figura 9.

Circuito	Elemento	Cantidad	Carga unitaria (W)	Carga total (W)	Voltaje (V)	Corriente (A)	FS	Protección	Conductor (AWG)
C1	Contactos	14	180	2520	127	19.84	1.00	1P x 20	12
C2	Reflectores	8	200	1600	127	15.75	1.25	1P x 20	12
C3	Bomba (proyectada)	1	1492	1492	127	14.69	1.25	1P x 15	12

Figura 9. Vista del cuadro de cargas condensando los resultados de (1) – (4).

La distribución de cargas dentro del recinto bajo estudio queda plasmada en el plano que se muestra en la Figura 10, el cual representa el eslabón inicial de las etapas presentadas en la Figura 3. Los cálculos previos y el diagrama unifilar permiten establecer la propuesta presentada en el plano eléctrico.

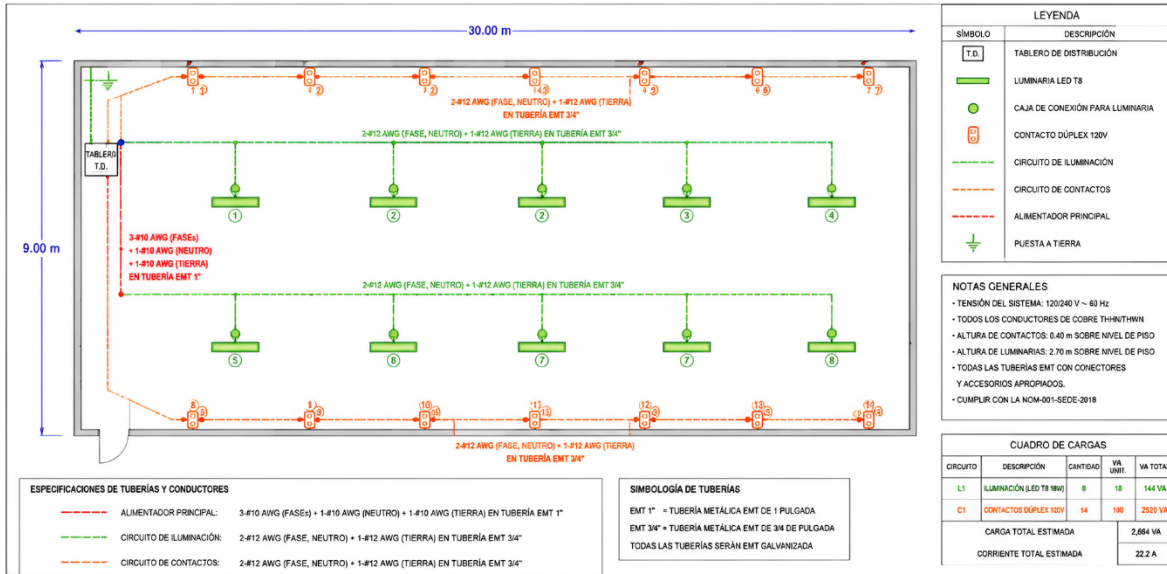


Figura 10. Vista del plano eléctrico mostrando la distribución de cargas. Se omiten el croquis y el cuadro de cargas porque se han presentado en las figuras previas.

Continuando con los elementos de un proyecto eléctrico, se considera la lista de materiales mínimos para poder ejecutar la actualización propuesta, asimismo, para fines de transparencia y optimización de recursos se presenta, en la Tabla 3, el desglose comercial obtenido de un comercio físico local. El total general de este material indispensable es de \$23 210.00 pesos MX.

Tabla 3. Cotización comercial en distribuidora eléctrica ubicada en el centro de Apizaco (mayo 2026).

Numeral	Descripción	Cantidad	Precio unitario (\$)	Subtotal
1	Reflector LED Industrial de 200W IP66 Profesional	8	1 450.00	11 600.00
2	Cable de Cobre Calibre 12 AWG THWN-2 (Rollo de 100 metros)	3	1 680.00	5 040.00
3	Tubo Conduit PVC Pesado de 3/4 pulgada (tramo de 3 metros)	30	85.00	2 550.00
4	Accesorios de Fijación (Coples, conectores, abrazaderas)	1 lote	650.00	650.00
5	Interruptor Termomagnético de 2 Polos x 15A (Square D)	1	380.00	380.00
6	Centro de Carga para Exterior NEMA 3R QOD2	1	450.00	450.00
7	Interruptor de Seguridad de Navajas 2x30A Exterior	1	520.00	520.00
8	Fusibles de Cartucho de 15 Amperes	2	45.00	90.00

Por otro lado, la imagen derecha de la Figura 6 muestra el módulo finalmente manufacturado y con los elementos eléctricos conectados, la misma figura muestra el uso de este para verificar su funcionalidad.

3.2. Discusión

Las aportaciones de este proyecto para un desarrollo e implementación efectivos incluyen los siguientes impactos:

Impacto técnico: reducción de riesgos eléctricos, cumplimiento normativo y mejora en la calidad de iluminación.

Impacto económico: disminución de costos operativos mediante eficiencia energética y selección de materiales adecuados.

Impacto social: fortalecimiento de la seguridad y bienestar de estudiantes, docentes y comunidades.

Formación profesional: desarrollo de competencias en diseño eléctrico, normatividad y análisis de calidad de energía, con conciencia de responsabilidad social.

4. CONCLUSIONES

El SIPP permitió a los estudiantes aplicar conocimientos técnicos en proyectos reales, fortaleciendo su formación profesional. La electrificación segura y eficiente de espacios públicos contribuye directamente al bienestar comunitario y a la justicia social. Los proyectos demostraron que la *praxis* profesional es una herramienta pedagógica eficaz para formar ingenieros capaces de responder a las demandas del mundo laboral y de la sociedad. La integración de normatividad, eficiencia energética y responsabilidad social en el diseño eléctrico constituye un modelo replicable para futuras generaciones de estudiantes. Los resultados muestran que la electrificación segura y eficiente es un factor clave para establecer la potencialidad del bienestar comunitario y la justicia social. La aplicación de normativas nacionales garantiza seguridad y sostenibilidad en espacios públicos, por lo que esta *praxis profesional* permitió a los estudiantes vincular teoría y práctica, generando soluciones viables y responsables. Este estudio de caso evidencia que la formación en ingeniería mecánica puede trascender lo técnico, integrando valores de equidad, seguridad y sustentabilidad en beneficio de la sociedad.

4.1. Trabajos futuros

Como trabajos futuros destaca la expansión del diseño eléctrico hacia diferentes áreas de la presidencia de Apizaquito, ya que la instalación general se encuentra igualmente obsoleta y aquellos entornos, tales como oficinas y baños, requieren actualización. Otro aspecto sugerido por realizar o recomendar, es el plan de mantenimiento para asegurar que la eficiencia energética no se degrade con el tiempo, por ello es importante establecer un calendario técnico.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la comunidad de San Luis Apizaquito y sus autoridades correspondientes por el apoyo para el desarrollo de este proyecto.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Becerril-López, D. O. (2008). *Instalaciones eléctricas prácticas*. Edición de autor. ISBN: 9709281801.
- Kelley, T. R., Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education*, 3(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z>
- Ortiz-Ortiz, Serafín y Díaz-Barriga, Ángel (2023). Fundamentos y orientaciones del Modelo Humanista Integrador basado en Capacidades (MHIC), Ciudad de México, Newton.
- Ramírez-Vicente, Ernesto (2024). La praxis profesional en el Modelo Humanista Integrador basado en Capacidades de la Universidad Autónoma de Tlaxcala”, *Revista Iberoamericana de Educación Superior (ries)*, vol. XV, núm. 44, pp. 154-168, doi: <https://doi.org/10.22201/iisue.20072872e.2024.44.1896>.
- Rodríguez-Rocha, J.C., Aguirre Vélez, C.I. (2023). *Instalaciones Eléctricas. Proyectos Residenciales e Industriales*. Trillas. ISBN: 9786071720948.
- Secretaría de Energía. (2012). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización)*. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Energía. (2013). *Norma Oficial Mexicana NOM-013-ENER-2013, Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en vialidades*. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Energía. (2014). *Norma Oficial Mexicana NOM-007-ENER-2014, Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios no residenciales*. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-002-STPS-2010, Condiciones de seguridad-Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo*. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2011). *Norma Oficial Mexicana NOM-029-STPS-2011, Mantenimiento de las instalaciones eléctricas en los centros de trabajo – Condiciones de seguridad*. Diario Oficial de la Federación.

PLASTIFICACIÓN INTERNA DEL ALMIDÓN POR MODIFICACIÓN QUÍMICA MEDIANTE INJERCIÓN DE GRUPOS PROVENIENTES DE GLICEROL.

INTERNAL PLASTICIZATION OF STARCH BY CHEMICAL MODIFICATION THROUGH THE INSERTION OF GROUPS DERIVED FROM GLYCEROL.

Arely Navarro-Balderrabano¹, Pedro Raymundo García-Morán^{1*}, Shirley Carro-Sánchez¹, Karina del Ángel-Sánchez².

¹Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Carretera Apizaquito S/N, San Luis Apizaquito, C.P. 90401, Apizaco, Tlaxcala.

² Tecnológico de Monterrey, Instituto de Materiales Avanzados para Manufactura Sostenible, Ave. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Col: Tecnológico, Monterrey, N.L., 64700, México

*pedroraymundo.garcia@uatx.mx

Recibido: 29-junio-2026

Aceptado: 30-06-2025

RESUMEN

En este documento se reportan los resultados de la modificación de almidón de maíz mediante la injercción de moléculas de glicerol en soluciones ácidas de un ácido fuerte, AF, como el ácido clorhídrico (HCl) y otra de un ácido débil (AD), como el ácido acético. En los espectros de infrarrojo se aprecia el incremento de la intensidad de la banda del grupo hidroxilo, OH, indicando que la cantidad de este grupo se ha incrementado. En las gráficas de tiempo de reacción contra la absorbancia, la cual es directamente proporcional a la concentración, para cada modificación, aunque los datos presentan cierta dispersión, claramente se aprecia un incremento, lo que indica el incremento del grado de modificación del almidón de maíz. Asimismo, se muestra una serie de películas preparadas a partir de almidón modificado y glicerol. De éstas, la muestra preparada con almidón modificado mediante ácido acético a 60°C por 24 hs, con almidón previamente remojado formó una película con mejores propiedades.

Palabras Clave: modificación de almidón, películas de almidón -glicerol, modificación de almidón por soluciones ácidas.

ABSTRACT

The results of the modification of corn starch by grafting glycerol molecules under acidic conditions are reported herein. Two reaction media were employed: a strong acid (AF), such as hydrochloric acid (HCl), and a weak acid (AD), such as acetic acid. In the infrared spectroscopy spectra of starch modified, using AF and AD, an increase in the intensity of the hydroxyl (OH) absorption band can be observed, indicating an increase in the amount of this functional group. The relationship between reaction time and absorbance, which is directly proportional to concentration, for each modification method is also reported. Although the data exhibit some degree of scatter, a clear increase in

absorbance with increasing reaction time is evident, making it possible to observe the increase in the degree of corn starch modification. A series of films prepared from modified starch and glycerol is presented. Among these, the film prepared from starch modified with acetic acid at 60°C for 24 h using pre-soaked starch shown better properties.

Keywords: starch modification, starch-glycerol films, starch modification by acid solutions.

1. INTRODUCCIÓN

El almidón, un polisacárido natural abundante y renovable, destaca como un componente crucial en la búsqueda de alternativas sostenibles a los plásticos derivados del petróleo. Ante la creciente preocupación global por la contaminación plástica y el agotamiento de los recursos fósiles, el almidón ofrece una solución prometedora. Su importancia radica en su naturaleza biodegradable y compostable (Jiang et al., 2020).

Para que el almidón pueda funcionar eficazmente como un bioplástico, su modificación química o física es esencial. Este proceso es fundamental porque transforma al almidón en un material con un intervalo de procesamiento más amplio y propiedades mecánicas mejoradas, permitiendo su uso viable en la fabricación industrial de productos que requieren durabilidad y resistencia, superando así las limitaciones de fragilidad del almidón sin modificar (Vaca-Ulloa y col., 2025)

El almidón nativo presenta una estructura semicristalina con fuertes interacciones de puentes de hidrógeno, lo que resulta en una baja estabilidad térmica y una tendencia a absorber humedad. Estas características dificultan su procesamiento por métodos convencionales, como extrusión o moldeo. Para la modificación del almidón existen diferentes métodos ya sea física o química. La modificación física implica la adición de plastificantes (como el glicerol o agua) y la aplicación de cizallamiento y calor, lo cual rompe esta estructura cristalina, reduciendo las interacciones intramoleculares y aumentando la flexibilidad de las cadenas poliméricas. Principalmente, se busca que los bioplásticos obtenidos a partir de almidón de maíz se degraden en subproductos seguros después de su uso, en condiciones normales de compostaje. Es por eso que el uso de plastificantes, como el agua y el glicerol, son las mejores alternativas para modificar la estructura interna del almidón y así obtener un material termoplástico con diferentes aplicaciones (Aburto et al., 1999).

De acuerdo con diferentes estudios se ha observado que para lograr una modificación eficaz del almidón es necesaria su desestructuración mediante su gelificación; la cual depende del tipo de almidón, la temperatura y la longitud de la cadena ramificada de amilopectina en proporción con la de amilosa. En conclusión, los almidones en proporción de amilosa: amilopectina 70:30 se gelatinizan alrededor de 160-170 °C y en proporción de amilosa: amilopectina 28:72 se gelatinizan alrededor de 52-65 °C (Fang et al., 2003). Sin embargo, en investigaciones previas se ha planteado una problemática. Cuenca et al. (2020) obtuvieron acetato de almidón de mandioca con un alto grado de sustitución, DS= 2.9, a partir de soluciones filmogénicas, utilizando como plastificante externo (2-dodecen-1-il) anhídrido succínico (DSA) a diferentes concentraciones. Obtuvieron películas, con buenas propiedades al desmoldarlas, pero luego de dos semanas de almacenamiento mostraron un comportamiento de segregación del plastificante hacia la superficie, lo que ocasionó que la película mostrara apariencia cerosa y quebradiza. También, emplearon el acetato de almidón

de mandioca como resina utilizando dos plastificantes externos, DSA y glicerol, a diferentes concentraciones. Utilizaron papel kraft como material para recubrir con dicha resina, a diferentes tiempos de contacto, dando como resultado agrietamiento a la hora de secar y segregación a la superficie de la película de los dos tipos de plastificantes.

Una solución a este problema puede ser la modificación química, la cual se centra principalmente en las reacciones de los grupos hidroxilo (-OH) del polímero, incluyendo la esterificación (como la acetilación), la eterificación y la oxidación, entre otras. Por ejemplo, la modificación con ácido acético logró aumentar la solubilidad y la estabilidad de la viscosidad, mejorando las propiedades de barrera y la tensión a la fractura en películas bioplásticas (Tomasik y col., 1995; Runkel y col., 1999).

En este trabajo se buscó modificar químicamente el almidón de maíz, a partir de soluciones ácidas, empleando grupos funcionales provenientes del glicerol, con la finalidad de otorgarle características plásticas internamente, buscando evitar la migración del plastificante y, por lo tanto, la pérdida de propiedades plásticas.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Plastificación de almidón

La plastificación en un polímero es una modificación física, se logra agregando un agente plastificante como agua, glicerol, sorbitol, polietilenglicol, entre otros. Con esto se logra disminuir las fuerzas intermoleculares, aumentar la movilidad de las cadenas poliméricas, reducir la fragilidad, disminuir la temperatura de transición vítrea, (Chiellini, 2008). Esta plastificación aumenta volumen libre, separa cadenas, disminuye cristalinidad efectiva y reduce viscosidad aparente; cuando estos agentes se usan con polisacáridos, como el almidón, los vuelve flexibles lo que permite formar películas flexibles. Sin embargo, la estabilidad térmica de la película es limitada; el calor provoca que el agente plastificante migre a la superficie y poco a poco se vaya perdiendo, haciendo que la película se vuelva rígida y quebradiza. Por otro lado, si el agente plastificante se injerta en el polisacárido la plasticidad del polímero será permanente y estable al calentamiento; por ejemplo, si se injerta una cantidad de glicerol en los grupos alcohol del almidón se tendría un termoplástico susceptible de ser moldeado en caliente. El almidón ha sido injertado, principalmente, con estireno y luego plastificado con glicerol (Fang y col. 2024), el estireno le confiere cierto carácter hidrofóbico.

2.2. Extracción del almidón

Las fuentes de almidón se pueden clasificar en tres grupos (Thomas et al., 2026); el primer grupo es el de los cereales, entre los que se encuentra el trigo, maíz, arroz, avena, cebadas y centeno; el segundo grupo es el de los tubérculos, en el que se hayan las papas o patatas, boniato (camote o batata), ñame, taro, yuca o mandioca; en el tercer grupo se encuentran las lentejas, garbanzos, frijoles, habas, chícharos o guisantes y soya. Aquí se mencionan solo algunas fuentes por grupo, cada uno con diferentes porcentajes de almidón. El almidón de maíz contiene 26 % de amilosa y 74 % de amilopectina, la fécula de maíz contiene gránulos de almidón de un tamaño medio de 14.3 μm . El gránulo de almidón está constituido por unidades esféricas ordenadas que, a su vez, comprenden láminas de amilosa y amilopectina, formando las zonas amorfas y cristalinas (Verma y Srivastav, 2021).

La extracción del almidón de maíz comprende las operaciones de maceración, molienda, separación del germen, separación de fibras, separación de proteína y secado del almidón. El remojo del grano

de maíz debilita sus fibras, eso transforma sus partes insolubles en solubles, provoca el hinchamiento del grano y la debilitación de los enlaces. Sin embargo, la última etapa en la que se lleva el secado del almidón representa la mayor dificultad, ya que al exceder la temperatura puede llegar a provocar la gelatinización de éste (Ji y col. 2004).

2.3. Modificación química de almidón de maíz

El almidón puede modificarse para cambiar las características fisicoquímicas mediante métodos físicos, químicos y enzimáticos. Entre los métodos químicos están la reticulación, esterificación, eterificación, oxidación, modificación dual, hidrólisis química, etc. (Verma & Srivastav, 2021). La reticulación de almidón afecta principalmente las propiedades físicas y el comportamiento de transición térmica del almidón, depende del origen del almidón y del agente de reticulación. Se pueden llegar a utilizar diferentes equipos como extrusores, secador de tambor, secador por aspersión, etc. que inciden en las características funcionales del almidón ya modificado (Verma & Srivastav, 2021). Este método evita el uso de reactivos peligrosos y enzimas costosas. Sin embargo, requiere de más tiempo y, por lo regular, de equipos costoso en comparación con otros métodos (Palavecino et al., 2019). En el método de oxidación de almidón se añade un oxidante que reacciona con el almidón a una temperatura y pH adecuados. Se utiliza hipoclorito para producir almidón oxidado, utilizado principalmente para adhesión, área alimenticia y para la formación de películas. Sin embargo, este proceso presenta una gran cantidad de aguas residuales alcalinas; así como un bajo rendimiento en la producción de almidón oxidado (Verma & Srivastav, 2021). La modificación dual usualmente combina dos métodos; por ejemplo: fisicoquímicos y enzimáticos; tomando en cuenta acetilación/oxidación, reticulación/acetilación o reticulación/hidroxipropilación por nombrar algunos, con el fin de mejorar las propiedades químicas y funcionales del almidón modificado dualmente (Verma & Srivastav, 2021). Cuando el almidón se modifica por esterificación o acetilación, el almidón se esterifica homogéneamente obteniéndose un termoplásticos con la capacidad de formar películas biodegradables., dicha modificación consiste en la desestructuración de los granos de almidón por medio de gelatinización. La esterificación solo se produjo con cloruros de acilo de 6 a 10 átomos de carbono. Esto evidenció que el almidón activado y el agua o hidróxido libres compiten por reaccionar con el cloruro de acilo. Las condiciones de reacción son adecuadas para una reacción exitosa con el almidón con cadenas en el intervalo de 6 a 10 átomos de carbono; fuera de este intervalo, los cloruros de acilo se hidrolizan bajo las condiciones de reacción y se convierten en sus sales, sin que se produjera sustitución del almidón (Fang et al., 2004). En el laboratorio, la reacción puede llevarse a cabo en un solo paso si se utiliza un ácido fuerte como catalizador. Sin embargo, con mayor frecuencia, la reactividad del ácido carboxílico se potencia convirtiéndolo primero en cloruro de ácido carboxílico, que luego reacciona con el alcohol (McMurry, 2012).

3. METODOLOGÍA

3.1 Sustancias químicas

Las sustancias químicas utilizadas fueron almidón de maíz para uso exclusivo de laboratorio de la marca MEYER, también se empleó glicerina pura para uso de laboratorio, ácido acético (A. Ac., CH₃COOH) al 99.90% en solución 1M, ácido clorhídrico (HCl) al 36.5-38% en solución 1M, alcohol metílico, hidróxido de sodio (NaOH) en solución 1M y como disolvente agua tridestilada.

3.2 Procedimiento para la modificación química del almidón de maíz

El método de modificación se basó en el reportado por Lahrouy y col. (2019). Como catalizador se usó un ácido débil, ácido acético, y un ácido fuerte, ácido clorhídrico, HCl. En algunas corridas el

almidón se sometió a un remojo previo por 48 horas, esto para mejorar la humectación y desestructuración del grano de almidón, en otras se usó sin remojar previamente.

Para la modificación se prepararon soluciones acuosas de glicerina (5 ml de glicerina en agua) y de almidón de maíz (5 g de almidón en agua), esto con la finalidad de desestructurar el almidón (Albertsson y Karlsson, 1995). Posteriormente, se mezclaron las dos soluciones en un matraz de fondo redondo de tres bocas sumergido en un baño caliente de sal, en lugar de aceite por seguridad, luego se adicionaron 3 ml de HCl 1M mediante goteo, manteniendo agitación y temperatura constante con ayuda de una plancha de calentamiento con agitación magnética. Se dejó reaccionar por 24 horas bajo reflujo. Pasado el tiempo de reacción se midió el pH de la mezcla obtenida, entonces se ajustó a un valor neutro usando una solución de NaOH 1M. Después se precipitó goteando la solución en 150 ml de metanol, posteriormente el precipitado se recuperó mediante filtración, el cual se secó a peso constante en estufa a 40°C. Con la finalidad de recuperar el almidón en la parte filtrada, ésta se sometió a evaporación en un rotavapor a vacío y 50°C, la cual también se secó a peso constante. Algunas muestras fueron sometidas a liofilización, para ello se congelaron previamente durante 24 hs, y entonces se liofilizaron durante 24 horas. Cuando la muestra mostró humedad visible se repitió el proceso. De igual forma, se secaron en estufa hasta peso constante.

3.3 Formación de películas de almidón de maíz

Se elaboraron películas mezclando almidón modificado químicamente, las películas se prepararon mediante el método de vaciado en placa; éste consiste en elaborar soluciones filogénicas al 5% p/p de almidón modificado adicionando glicerol y agua tridestilada (0, 15, 25, 35 y 45 % p/p), homogenizando mediante agitación, luego se sometieron a reflujo a una temperatura de 90 °C. Las soluciones filmogénicas se vertieron en un molde de vidrio rectangular con dimensiones de 2 cm de ancho por 10 cm de largo, luego se dejaron solidificar a temperatura ambiente. De esta forma, una vez secas, se obtuvieron las películas para cada muestra, respectivamente.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Mediante la modificación química se busca la injercción de moléculas de glicerol en los grupos hidroxilo, -OH, de la molécula de almidón. La señal de característica, por espectroscopía de infrarrojo, del grupo -OH se localiza alrededor de los 3256 cm^{-1} . La Figura 1 presenta las curvas para las muestras C1AF60-2, C5AF60-13, C6AF60-16, C8AF60-22 y almidón sin modificar, la figura solo muestra la banda del grupo OH y no todo el espectro debido a que es la banda donde mejor se aprecian los cambios. Las modificaciones se hicieron usando un ácido fuerte (AF), como el HCl 1M, a una temperatura de 60 °C para 2, 13, 16 y 22 horas de reacción. En todos los casos se observa un incremento de la intensidad de la señal para el grupo -OH respecto de la intensidad del almidón sin modificar lo que indica que se logró injertar la molécula de glicerol en el almidón.

Por otro lado, la Figura 2 presenta las curvas de espectroscopia de infrarrojo para diversas muestras de almidón modificado; la modificación fue catalizada con un ácido débil, AD, como el ácido acético 1M, las corridas se hicieron a 50 °C y tiempos de reacción de 20, 30, 40 y 60 horas. Las muestras se denominaron como C1AD50-20, C2AD50-30, C3AD50-40, C4AD50-50, C5AD50-60 y se comparan con almidón sin modificar. En todos los casos se observa un ligero incremento de la intensidad de la señal para el grupo -OH respecto de la intensidad del almidón sin modificar

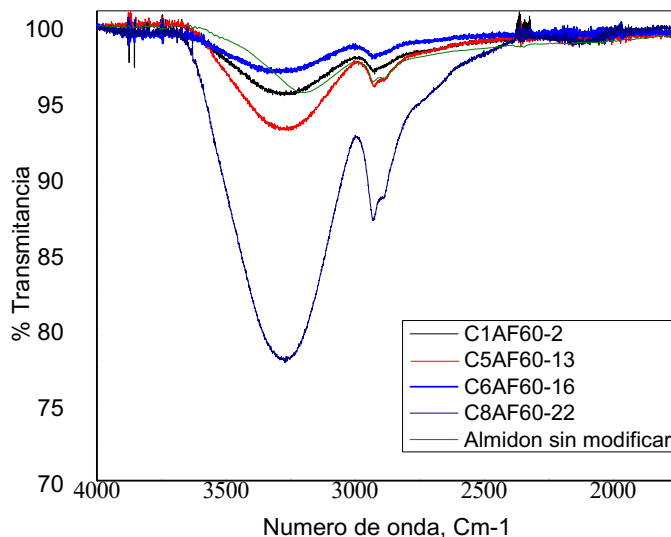


Figura 1. Espectros de infrarrojo para diversas muestras de almidón modificado, modificación catalizada con un ácido fuerte, AF, como el HCl 1M, modificación realizada a 60 °C y tiempos de reacción de 2, 13, 16 y 22 horas.

Comparando las Figuras 1 y 2 se observa que cuando en la reacción de modificación se usó un ácido fuerte, como el ácido clorhídrico, la señal correspondiente al grupo -OH es más intensa, lo que indica que la injercción de glicerol en almidón es mayor.

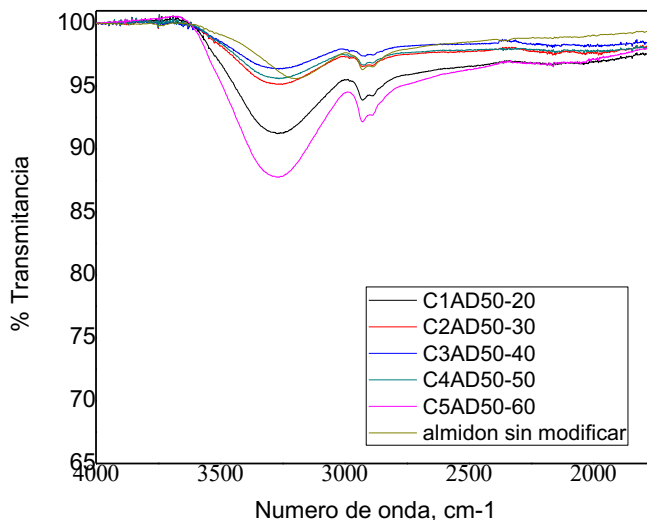


Figura. 2. Espectros de infrarrojo para diversas muestras de almidón modificado, modificación catalizada con un ácido débil, AD, como el ácido acético 1M, modificación realizada a 50 °C y tiempos de reacción de 20, 30, 40, 50 y 60 horas.

El incremento de la concentración de grupos OH, con respecto del tiempo, se puede estimar en función de la intensidad de la banda característica de 3256 cm⁻¹ para dicho grupo funcional. Para ello se usan los espectros de infrarrojo de los cuales se recuperó el % Transmittancia para el grupo

OH, dado que la absorbancia es proporcional a concentración, $A=\epsilon/lc$, siendo ϵ coeficiente de absorción molar o absorptividad molar, l la longitud de la celda o camino óptico y c concentración de la especie absorbente, en este caso el grupo OH. Las absorbancias se determinaron mediante ecuación 1 (Atkins & de Paula, 2006).

$$A = -\log_{10} \left(\frac{\%T}{100} \right) \tag{1}$$

donde % T es el porciento de transmitancia y A la absorbancia.

La Figura 3 muestra la evolución de la absorbancia de los grupos -OH, en muestras de almidón modificado. No obstante, a pesar de tener pocos puntos se puede apreciar que la proporción de grupos OH, provenientes de la molécula de glicerol, se incrementa al paso del tiempo, la muestra correspondiente a 22 horas de reacción es la que muestra el mayor incremento.

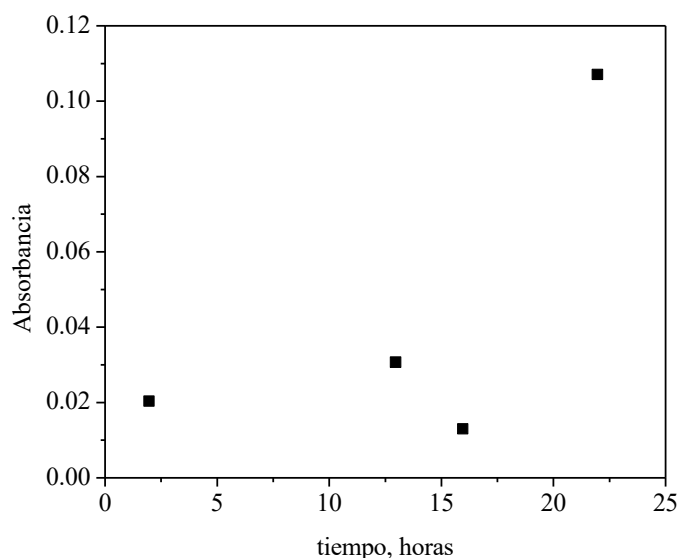


Figura. 3. Incremento de la proporción de grupos OH en muestras de almidón modificado conforme aumenta el tiempo de reacción. Muestras modificadas con glicerol, usando HCl como catalizador y 60 °C.

En cuanto a la modificación empleando un ácido débil, AD, como el ácido acético, correspondientes a las curvas mostradas en la Figura 2. La Figura 4 muestra el incremento de la absorbancia debido al incremento de la concentración de grupos OH en las muestras de almidón modificadas. La muestra a 2 horas muestra una proporción de alrededor de un 20 %, lo que parece anómalo para el tiempo de reacción; el resto de las muestras presentan un comportamiento más congruente, siendo la muestra de 60 horas la que alcanzó la mayor modificación.

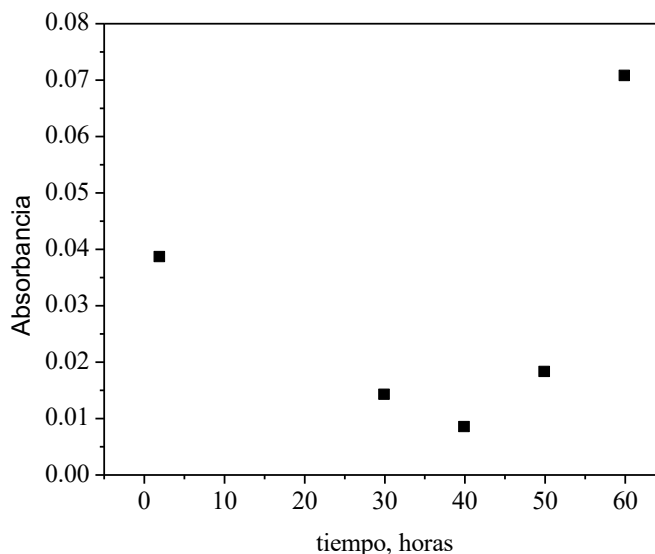


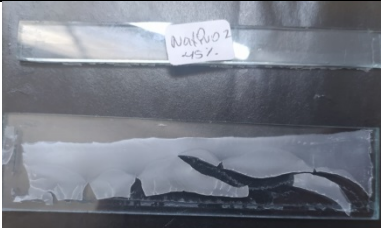

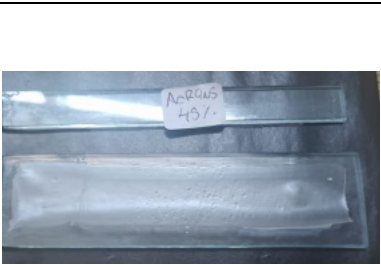

Fig. 4. Incremento de la proporción de grupos OH en muestras de almidón modificado conforme aumenta el tiempo de reacción. Muestras modificadas con glicerol, usando ácido acético como catalizador y 50 °C.

4.1 Películas de almidón de maíz

Las películas se prepararon a partir de una solución en la que se puso glicerol, almidón modificado y se sometió a calentamiento a reflujo; una vez que la mezcla se homogenizó se vació en un molde de aluminio de 10x2x1 cm y se dejó enfriar y solidificar a temperatura ambiente. Se hicieron muchas corridas, en su mayoría, las películas no presentaron flexibilidad, una vez secas se volvieron frágiles y quebradizas, pero algunas si lograron ser flexibles.

En la Tabla 1 se presentan ejemplos de las películas obtenidas, como la película de almidón sin modificar, así como la preparada con almidón modificado usando HCl como catalizador, AF11-60-NR-45, que resultaron quebradizas, y dos muestras catalizadas con ácido acético, de éstas la película AD2-60-R-45 mostró las cualidades buscadas, como flexibilidad y estabilidad mecánica.

Tabla 1. Algunas películas obtenidas a partir de soluciones de polímero modificado o polímero sin modificar conteniendo 45 % de glicerol respecto al peso del almidón.

Muestra	Película	Análisis
Almidón sin modificar		Película quebradiza, frágil, no permite su manejo.
AF11-60-NR-45		Película preparada con almidón sin remojo previo, modificado mediante glicerol y HCl 1M, 60 °C por 24 hs. La película tendió agrietarse y romperse al separarla del molde.
AD78-R-45		Película preparada con almidón modificado mediante ácido acético, 78°C por 1 hora y 23 min, previamente remojado. La película se pudo someter a una prueba de tensión, se rompió de manera desigual arrojando datos erróneos.
AD2-60-R-45		Película preparada con almidón modificado mediante ácido acético, 60°C por 24 hs, previamente remojado. Formó la mejor película, se sometió a una prueba de tensión permitiendo la obtención del Módulo de Young.

5. CONCLUSIONES

De los dos sistemas probados para modificar el almidón de maíz se encontró que los que utilizan un ácido fuerte, como el ácido clorhídrico alcanzan mayor grado de modificación, indicado como un incremento en la señal para el grupo OH en los espectros de infrarrojo a partir de las 22 horas de reacción química. En tanto que los sistemas en los que se utilizó un ácido débil, como el ácido acético, se observó que la modificación es más ligera, ya que se aprecia que se alcanzó la mayor modificación a las 60 horas de reacción. En cuanto a la formación de película, la muestra que emplea

almidón previamente remojado, con ácido débil como catalizador, mostró las mejores cualidades como flexibilidad, estabilidad mecánica y no se rompe con facilidad al manipularla.

CONFLICTO DE INTERESES

No existen conflictos que declarar

REFERENCIAS

Atkins, P., & de Paula, J. (2006). Atkins' physical chemistry (8th ed.). Oxford University Press.

Aburto, J., Alric, I., Thiebaud, S., & Panayiotou, C. (1999). Synthesis, characterization, and biodegradability of fatty-acid esters of amylose and starch. *Journal of Applied Polymer Science*, 74(6), 1440–1451. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19991107\)74:6<1440::AID-APP17>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19991107)74:6<1440::AID-APP17>3.0.CO;2-V)

Chiellini, E. (Ed.). (2008). Environmentally compatible food packaging. Elsevier/Woodhead Publishing.

Cuenca, P. S., Ramallo, L., & Albani, O. (2020). Películas y materiales compuestos basados en almidón de mandioca acetilado de alto grado de sustitución. *RECYT*, 33, 85–93.

Fang, J., & Fowler, P. (2003). The use of starch and its derivatives as biopolymer sources of packaging materials. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 1(3), 82–84.

Fang, K., Wang, H., Wang, X., Xia, F., et al. (2024). An intensive exploration of plasticization, tensile, flexural and ecotoxicity of styrene-grafted thermoplastic starch (TPS) composite material. *Industrial Crops and Products*, 220, 119285. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119285>

Ji, Y., Seetharaman, K., & White, P. J. (2004). Optimizing a small-scale corn-starch extraction method for use in the laboratory. *Cereal Chemistry*, 81(1), 55–58. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.1.55>

Jiang, T., Duan, Q., Zhu, J., Liu, H., & Yu, L. (2020). Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(1), 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.003>

Lahrou, S., & Benali, A. B. (2019). Glycerin-grafted starch as corrosion inhibitor of C-Mn steel in 1 M HCl solution. *Applied Sciences*, 9(22), 1–18. <https://doi.org/10.3390/app9224758>

McMurry, J. (2012). Organic chemistry (8th ed.). Brooks/Cole, Cengage Learning.

Palavecino, P. M., Penci, M. C., & Ribotta, P. D. (2019). Impact of chemical modifications in pilot-scale isolated sorghum starch and commercial cassava starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.158>

Runkel, D., Stoye, H., Rapphel, I., & Kakuschke, R. (1999). Method for preparation of starch esters (German Patent DE 19805367).

Thomas, S., James, J., Maria, H. J., & James, J. (Eds.). (2026). Polymer interfacial characteristics: In polymer blends, IPNs, gels, and composites. De Gruyter.

Tomasik, P., & Jane, J.-L. (1995). Reaction of starch and cellulose with products of thermal decomposition of mono- and disaccharides. *Starch/Stärke*, 47(1), 24–29. <https://doi.org/10.1002/star.19950470107>

Vaca-Ulloa, K. E., Mena Pastor, P. G., & Saquicela Cruz, P. S. (2025). Bioplásticos a partir de almidón modificado: Avances en propiedades y biodegradabilidad. *Horizonte Académico*, 5(1), 356–371. <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n1.87>

Verma, D. K., & Srivastav, P. P. (2022). Isolation, modification, and characterization of rice starch with emphasis on functional properties and industrial application: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(24), 6577–6604. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1903383>