



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“MODIFICACIÓN DE UN EQUIPO COMERCIAL DE BAJO TARJA PARA GENERACIÓN DE NITRÓGENO DE USO DOMÉSTICO EN LA CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS”

TESIS

Presentado como requisito para obtener el grado de:

LICENCIADA EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

GLORIA IXCHEL ZARATE AGUILAR

DIRECTOR DE TESIS

**M.I.Q Y M.D.P MAGIN IDELFONSO
TORREBLANCA RAMÍREZ**

Contenido

Introducción	6
Problema de investigación	7
Objetivos.....	9
Objetivo General.....	9
Objetivo Específico	9
Justificación.....	10
Hipótesis	11
Capítulo 1 Antecedentes.....	12
1.1 Contexto general: El desperdicio de alimentos y la necesidad de conservación.	12
1.2 Nitrógeno como agente conservador	14
1.2.1 Aplicaciones en la industria alimentaria	14
1.2.2 Equipos comerciales y semiindustriales.....	15
1.2.3 Ventajas de la generación de nitrógeno in situ	15
1.3 Generación de nitrógeno: De la industria al entorno doméstico.....	15
1.3.1 Evolución tecnológica y accesibilidad	16
1.3.2 Componentes y funcionamiento de los generadores de nitrógeno doméstico	16
1.3.3 Aplicación en entornos domésticos y reducción de costos con retorno de inversión	16
1.3.4 Aprovechamiento de sistemas de ósmosis inversa de seis etapas.....	17
1.4 Innovación tecnológica en la conservación doméstica	18
1.4.1 Secuencia del proceso: Diseño adaptado y funcional.....	18
1.5 Innovación tecnológica y políticas públicas en México.....	20
Capítulo 2 Marco teórico	22
2.1 Desperdicio de alimentos: Un problema global.....	22
2.2 Nitrógeno en la conservación de alimentos	23
2.3 Componentes de un generador de nitrógeno.	23
2.4 Teoría básica de generadores de nitrógeno	24
2.5 Aplicación doméstica del generador de nitrógeno	25

2.6 Normatividad aplicable del nitrógeno para la conservación de alimentos y regulaciones en México	25
2.7 Instrumentación de generadores de nitrógeno	26
2.8 Dopado de carbón activado con cloruro férrico.....	27
2.9 Método de preparación y optimización	28
2.10 Impacto ambiental, económico y social del generador de nitrógeno en el hogar.	29
Capítulo 3 Metodología.....	31
3.1 Materiales, equipo e insumos	31
3.2 Procedimiento experimental.....	32
3.2.1 Dopado del carbón activado con cloruro férrico	34
3.2.2 Preparación de las soluciones de FeCl ₃	34
3.3 Secado y pesado del carbón activado.....	37
3.3.1 Secado y activación de la zeolita 3A	38
3.4 Montaje de cartuchos rellenables en el equipo	39
3.5 Arreglo de conexión y suministro de aire.....	39
3.5.1 Válvulas instaladas	40
3.5.2 Tiempo de operación.....	40
3.6 Medición con oxímetro.....	40
Análisis de datos.....	40
3.7 Estimación del contenido de nitrógeno	41
3.8 Creación del modelo 3D	41
3.9 Evaluación de la conservación del alimento	42
Capítulo 4 Resultados y discusión	44
4.1 Diagrama de flujo general del proceso.....	44
4.1.1 Esquema del sistema modificado (DTI) indicando cada etapa y su función.	45
4.1.2 Justificación de la secuencia de etapas.....	47
4.1.3 Variables independientes	48
4.1.4 Variables dependientes.....	49
4.2 Descripción del equipo y materiales. Especificaciones técnicas de cada componente.	51

4.3 Operación manual del sistema	57
4.4 Análisis de costos	59
4.5 Análisis de datos. Métodos de registro de datos en bitácora.....	60
4.5.1 Ensayos con alimentos	60
4.5.2 Gráficos esperados: O2% VS Tiempo y %N2 VS Tiempo.	62
Conclusiones.....	65
Observaciones adicionales del sistema.....	65
Recomendaciones para uso y vida útil	65
Bibliografía	68
Anexos	70
Anexo 1. Diagrama de flujo de proceso del sistema.	70
Anexo 2. Diagrama de tuberías e instrumentación.	71

Índice de figuras

Figura 1. Merca2.0. (2021). Gráfica del día: La magnitud del desperdicio de alimentos.	22
Figura 2. Carbón activado reposando en la solución de cloruro férrico.....	36
Figura 3. Carbón activado dopado con cloruro férrico después del lavado con agua destilada.	37
Figura 4. Carbón activado dopado con cloruro férrico secado a temperatura ambiente a 0.3 M.....	38
Figura 5. Carbón activado dopado con cloruro férrico secado a temperatura ambiente a 0.6 M.....	38
Figura 6. Zeolita 3A posteriormente activada y pesada.	39
Figura 7. Modelo 3D inicial.	41
Figura 8. Representación de las 3 muestras de la evaluación de la conservación de alimentos.	43
Figura 9. Representación de las 3 muestras de la evaluación de la conservación de alimentos.	43
Figura 10. Diagrama básico del equipo final.	44
Figura 11. Secuencia de flujo en el equipo.	46
Figura 12. Compresor de aire. Marca Truper, modelo COMP-AERO (Código 17247). .	51
Figura 13. Válvulas de aguja de acero inoxidable 304 de ½ y ¼.	51
Figura 14. Porta cartucho tamaño estándar de 10”. Marca Evans.....	52
Figura 15. Membrana ULP-2012-100G.	53
Figura 16. Cartucho abrillantador con carbón activado. Marca Evans.	53
Figura 17. Lámpara ultravioleta. Marca Evans.	54
Figura 18. Membrana de ultrafiltración. Marca Evans.	55
Figura 19. Carcasa tamaño estándar.	56
Figura 20. Resultados de las condiciones de la muestra 1 de control.	61
Figura 21. Resultados de las condiciones de la muestra 1 de control.	61
Figura 22. Resultados de las condiciones de la muestra 2 en bolsa original inyectada con N2.....	61
Figura 23. Resultados de las condiciones de la muestra 2 en bolsa original inyectada con N2.....	61
Figura 24. Resultados de las condiciones de la muestra 3 en recipiente hermético. .	62
Figura 25. Resultados de las condiciones de la muestra 3 en recipiente hermético. .	62

Índice de tablas y gráficas

Tabla 1. Comparación entre el peso inicial, peso húmedo y peso final.	37
Tabla 2. Precios detallados de cada componente del equipo modificado.....	59
Tabla 3. Resultados de las pruebas de concentración de oxígeno y nitrógeno en función del tiempo de operación.	63
Gráfica 1. Variación del %O ₂ en función de operación del sistema modificado.	63
Gráfica 2. Variación del %N ₂ en función del tiempo de operación del sistema modificado.	64

Introducción

El desperdicio de alimentos es un problema global que afecta profundamente la economía, el medio ambiente y la sociedad. En México, se estima que aproximadamente el 35% de los alimentos producidos se desperdician, lo que equivale a una gran pérdida significativa de recursos y el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así al cambio climático (FAO, 2021).

Una de las principales causas de este desperdicio en los hogares es el deterioro prematuro de los alimentos debido a prácticas inadecuadas de conservación. En este contexto, se hace evidente la necesidad de desarrollar tecnologías que permitan prolongar la vida útil de los alimentos. Una de las soluciones más prometedoras es el uso de nitrógeno, un gas inerte que constituye aproximadamente el 78% de la atmósfera terrestre.

El nitrógeno es capaz de desplazar el oxígeno en los envases, inhibiendo así el crecimiento de microorganismos y reduciendo los procesos de oxidación, dos de las principales causas del deterioro de los alimentos (Carburos metálicos, 2022). Sin embargo, la generación de nitrógeno ha estado tradicionalmente limitada a aplicaciones industriales debido a la complejidad y los costos asociados con los equipos necesarios.

La ósmosis inversa es una tecnología de separación que utiliza membranas semipermeables para eliminar partículas y solutos de alto peso molecular de los fluidos. Aunque su uso más común se encuentra en el tratamiento de agua potable y procesos industriales, recientes avances sugieren que también puede ser adaptada para la separación de gases, incluyendo la generación de nitrógeno.

La presente tesis propone la modificación de un equipo comercial de ultrafiltración para que utilice tecnología de ósmosis inversa en la generación de nitrógeno de alta pureza. El objetivo principal es adaptar esta tecnología a un formato doméstico, facilitando la conservación de alimentos de manera más eficiente y sostenible. Con ello se busca ofrecer una solución práctica que contribuya a reducir el desperdicio de alimentos y a mitigar los impactos económicos y ambientales asociados.

La investigación se enfocará en el diseño y la optimización del sistema modificado, evaluando su eficiencia en la producción de nitrógeno, su aplicabilidad en el hogar y su impacto en la extensión de la vida útil de diversos productos alimenticios.

Asimismo, se analizará la viabilidad técnica y económica del equipo, considerando factores como la pureza del gas generado, la facilidad de uso y los costos asociados con su implementación. En pocas palabras, esta investigación busca desarrollar una alternativa innovadora y accesible para los hogares mexicanos, se coordina con las tendencias globales de sostenibilidad y eficiencia en el uso de recurso, al tiempo que contribuye a la seguridad alimentaria y a la reducción de la huella ambiental.

Problema de investigación

El nitrógeno es, sin duda, un elemento clave en la industria alimentaria, y su versatilidad se refleja en una amplia gama de aplicaciones que van mucho más allá de simplemente mantener la frescura de los alimentos. Profundicemos en algunas de las formas en que el nitrógeno desempeña un papel esencial en este sector.

El envasado con atmósfera modificada (MAP) es una técnica crucial que involucra el uso de nitrógeno y otros gases inertes como el dióxido de carbono y el argón. Esta técnica revoluciona la conservación de alimentos al crear un ambiente controlado dentro del empaque. El nitrógeno desplaza el oxígeno, reduciendo así la oxidación de los alimentos y evitando que los microorganismos prosperen. Esto no solo prolonga la vida útil de los productos, sino que también ayuda a mantener su frescura y calidad, algo fundamental en la industria alimentaria, donde la seguridad y la satisfacción del cliente son prioridades clave.

La congelación criogénica es otra aplicación destacada del nitrógeno líquido en la industria alimentaria. Este proceso se utiliza para congelar alimentos de manera extremadamente rápida, lo que preserva su textura y calidad. Frutas, verduras, productos horneados y otros productos perecederos pueden mantenerse frescos durante más tiempo gracias a esta técnica.

El almacenamiento y transporte de alimentos congelados también dependen en gran medida del nitrógeno líquido. Mantener temperaturas extremadamente bajas en cámaras y contenedores es esencial para evitar la degradación de los productos. Esto garantiza que los alimentos lleguen a los consumidores en condiciones óptimas.

Un aspecto crítico que a menudo pasa desapercibido es la prevención de atmósferas explosivas en industrias que manipulan sustancias pulverizadas o polvos, como la producción de harina o productos de cacao. Aquí, el nitrógeno se utiliza para desplazar el oxígeno y reducir el riesgo de explosiones, lo que mejora significativamente la seguridad en el lugar de trabajo.

En la fabricación de alimentos, como la producción de chocolate o productos lácteos, el nitrógeno líquido es una herramienta esencial para equipos de enfriamiento y control de temperatura. Esto permite un control preciso de los procesos de producción, lo que a su vez garantiza la calidad y consistencia del producto final.

Incluso en el mundo de las bebidas, el nitrógeno encuentra su lugar. Algunos tipos de cervezas y bebidas carbonatadas se benefician de la inyección de nitrógeno, lo que proporciona una textura suave y cremosa que los consumidores aprecian.

Sin embargo, es importante destacar que, en todas estas aplicaciones, el nitrógeno utilizado en la industria alimentaria debe cumplir con estándares de pureza rigurosos para garantizar la seguridad y la calidad de los productos. Además, es fundamental tomar medidas de

seguridad adecuadas al manipular nitrógeno líquido, ya que su extremadamente baja temperatura puede causar quemaduras por congelación si entra en contacto con la piel.

Finalmente, en términos de normatividad, es esencial que las empresas alimentarias cumplan con las normativas pertinentes para el uso de nitrógeno, que generalmente se centran en garantizar la seguridad y calidad de los alimentos. Estas regulaciones son establecidas por agencias gubernamentales responsables de la seguridad alimentaria, como la FDA en los Estados Unidos o la EFSA en Europa. Los estándares específicos pueden variar según la región y el tipo de alimento procesado. Por lo tanto, para estar al día con las regulaciones relativas al uso de nitrógeno en el procesamiento de alimentos, se recomienda consultar a las autoridades reguladoras locales o a las asociaciones industriales pertinentes.

Objetivos

Objetivo General

- Integrar un proceso que combine separación de oxígeno de nitrógeno presente en el aire y complementar el proceso con una osmosis inversa comercial de 6 etapas para lograr la separación de nitrógeno.

Objetivo Específico

- Mejorar la eficiencia de remoción de humedad a partir del uso de Zeolita 3A en la línea de aire de alimentación, asegurando condiciones óptimas para la separación de nitrógeno.
- Optimizar como etapa de adsorción selectiva en la eliminación de oxígeno contenido en la corriente de aire, empleando carbón activado dopado con cloruro de hierro para mejorar la eficiencia del proceso.
- Modificar la configuración de un sistema de ósmosis inversa de 6 etapas para la separación de nitrógeno, evaluando su rendimiento en términos de pureza y flujo del gas generado.
- Evaluar la eficiencia del sistema modificado, determinando la concentración y composición del nitrógeno en la corriente de salida, así como su efecto en muestras de control utilizadas para conservación de alimentos.

Justificación

El nitrógeno, al desplazar el oxígeno, crea una atmósfera libre de este gas, lo que reduce significativamente el riesgo de oxidación en productos alimenticios sensibles como aceites, nueces y grasas. Esta propiedad resulta especialmente valiosa, ya que evita que estos alimentos se vuelvan rancios y pierdan sus atributos sensoriales.

Además, la capacidad del nitrógeno para controlar el crecimiento microbiano es esencial para garantizar la seguridad de una amplia gama de productos, desde carnes hasta productos de panadería. Al eliminar el oxígeno, el nitrógeno obstaculiza la proliferación de microorganismos aeróbicos, que necesitan oxígeno para llevar a cabo sus procesos metabólicos. Esto asegura que los alimentos se mantengan libres de contaminantes microbianos dañinos.

Otro beneficio fundamental es su capacidad para extender la vida útil de los alimentos. Al minimizar factores como la oxidación y el crecimiento de microorganismos, el nitrógeno contribuye a mantener la calidad, el sabor y el valor nutricional de los alimentos durante períodos prolongados. Esta extensión en la vida útil no solo es beneficiosa desde el punto de vista económico, al reducir el desperdicio de alimentos, sino que también promueve prácticas de consumo más sostenibles.

La versatilidad del nitrógeno lo convierte en el conservante preferido en diversas categorías de alimentos. En envases de atmósfera modificada, congelación criogénica o molienda de alimentos, el nitrógeno garantiza que los productos mantengan su textura, sabor y calidad, incluso después de prolongados períodos de almacenamiento.

Además, el uso de nitrógeno como conservante ofrece una alternativa más ecológica a los conservantes químicos, alineándose con las preferencias de los consumidores por etiquetas de ingredientes más limpias y transparentes. Esto no solo beneficia la salud de los consumidores, sino que también contribuye positivamente al medio ambiente al minimizar el impacto de estos aditivos en el ecosistema.

El nitrógeno desempeña un papel esencial en la conservación de alimentos al inhibir la oxidación, controlar el crecimiento microbiano, extender la vida útil y ofrecer una alternativa sostenible a los conservantes químicos. Su versatilidad y eficacia lo convierten en una herramienta invaluable en la industria alimentaria para garantizar la seguridad, la calidad y la sostenibilidad de los productos alimenticios. Su implementación en hogares podría representar una mejora significativa en la conservación de alimentos, beneficiando tanto a los consumidores como al medio ambiente.

El uso del nitrógeno gas para la conservación de alimentos es una utilidad común en diversas industrias debido a sus propiedades inertes, su capacidad para desplazar el oxígeno y la prevención de reacciones de oxidación.

Hipótesis

Comprobar si un equipo comercial de bajo tarja de 6 etapas, diseñado originalmente para el tratamiento de agua potable mediante ósmosis inversa, es modificado mediante la incorporación de etapas especializadas en la eliminación de humedad y la adsorción selectiva de oxígeno, empleando carbón activado dopado con cloruro de hierro y zeolitas, entonces se podrá generar nitrógeno de alta pureza ($>75\%$) para aplicaciones domésticas. Esto permitirá desplazar el oxígeno y el aire en empaques de alimentos, incrementando su tiempo de conservación sin aumentar significativamente los costos ni comprometer la simplicidad operativa del sistema.

Capítulo 1 Antecedentes

1.1 Contexto general: El desperdicio de alimentos y la necesidad de conservación.

El desecho de alimentos es un desafío de gran escala en términos económicos, sociales y ambientales. En todo el mundo, se considera que cerca del 30% al 40% de los alimentos producidos no son consumidos, lo que implica a más de mil millones de toneladas al año (FAO, 2022). Ahora sabemos que México ocupa el quinto lugar a nivel mundial en generación de desperdicio de alimentos domésticos, lo cual genera 11.98 millones de toneladas anuales (Merca2.0, 2021).

Esta problemática no solo implica el uso ineficiente de recursos naturales de recursos naturales, además de eso también genera impactos ambientales críticas: Alrededor de 8% al 10% de la producción de emisiones globales de efecto invernadero que provienen de desechos alimentarios (UNEP, 2021).

Una gran cantidad de desperdicio doméstico se debe a la degradación temprana de productos perecederos, como lácteos, carnes, pan, verduras y frutas, lo que representa unido estrechamente a prácticas de conservación deficientes. Por consiguiente, la mejora de los métodos de preservación alimentaria refleja una estrategia clave para atacar este problema a nivel doméstico.

Conforme avanza el tiempo, crece la presión sobre los sistemas alimentarios por el cambio climático y el aumento población, se debe crear una estrategia esencial sobre la prevención del desperdicio de alimentos que garantice la seguridad alimentaria global. La FAO nos propone que para reducir en millones de toneladas las emisiones de CO₂ y alimentar a más de mil millones de personas, se debe implementar reducir a la mitad el desperdicio de alimentos hacia el año 2030 como lo indica el ODS 12.3.

Las tecnologías domésticas de conservación de alimentos como los sistemas de atmósfera modificada o de control de gases, en Latinoamérica representan una alternativa viable para la población, pero especialmente para familias, comercios pequeños y cooperativas rurales. Estos esfuerzos se enfocan en el fortalecimiento de capacidades tecnológicas y el desarrollo de soluciones innovadoras que se adaptan a nivel global.

Esta investigación plantea la implementación de equipos modificados para generar nitrógeno doméstico, sin necesidad de refrigeración intensiva o químicos sintéticos y así reducir el impacto ambiental del desperdicio y fortalecer la seguridad alimentaria, y así convertirse en una herramienta transformadora con alto potencial de replicabilidad y bajo costo. Este impulso de tecnologías accesibles para la conservación de alimentos domésticos en México podría lograr un cambio cultural y operativo.

El problema de desperdicios en México es un componente prioritario para las agendas de política pública y así brindar a la población el derecho a la seguridad alimentaria y el desarrollo sustentable. La ley general de alimentación adecuada y sostenible desde el 2023 tiene como objetivo nacional la reducción del desperdicio alimentario, a base de la recuperación de alimentos a lo largo de la cadena de valor, promoviendo así estrategias de conservación en el ámbito doméstico.

Los programas de apoyo alimentario comunitario y estrategias se centran en la redistribución de excedentes y no en la prevención de las pérdidas, como escuelas de tiempo completo, desayunos escolares del DIF, convenios entre la secretaria del bienestar y organizaciones como el banco de alimentos de México (BAMX), lo cual están dejando un vacío técnico en cuanto a tecnologías a nivel doméstico y comunitario.

Hay una limitada adopción de soluciones tecnológicas en la conservación de alimentos y entidades como Ciudad de México, Puebla y Jalisco han implementado campañas para reducir el desperdicio en mercados públicos, huertos urbanos, comedores comunitarios y algunas metas de desarrollo dirigidas a la seguridad alimentaria, por lo tanto se puede observar una brecha de innovación que puede ser atendida desde la ingeniería aplicada.

El equipo propuesto en esta investigación se alinea con los objetivos de los programas sociales vigentes y puede mejorar con alianzas entre instituciones académicas, gobiernos locales y organizaciones civiles, así obteniendo la posibilidad de integrar sistemas de conservación por desplazamiento de oxígeno en cocinas comunitarias, comedores escolares o incluso en hogares rurales debido a su bajo costo y dispositivo sencillo, representando una democratización a el acceso a la tecnología alimentaria y contribuir a la reducción del desperdicio de alimentos domésticos bajo un enfoque de soberanía, salud pública y economía circular.

La estandarización facilita la conectividad entre normas en términos de dimensiones, materiales y conexiones, como son las normas nacionales NMX-AA-179-SCFI-2018 Y normas internaciones como ISO 10545, ASTM D2651 Y NSF/ANSI 58, en este caso para obtener la posibilidad de adaptar tecnologías existentes sin necesidad de rediseñar todo el sistema. Por lo tanto, se observa la evolución de la ingeniería aplicada al tratamiento de agua y gases permitiendo que algunos componentes y dispositivos estén disponibles y estandarizados.

El equipo base de esta investigación que es un sistema de ósmosis inversa de bajo tarja con seis etapas está diseñado para operar con cartuchos de 2.5" x 10", conexiones de ¼" y presiones de trabajo entre 40 y 60 psi, se compone de una etapa de sedimentos, dos de carbón activado, una membrana de ósmosis inversa de baja presión, un cartucho de carbón granular y una lámpara ultravioleta de desinfección. En resumen, el equipo es ideal para fines de modificación sin necesitar equipos especializados o piezas de importación compleja.

En la presente investigación se propone una reingeniería mediante cambios técnicos mínimos, pero de alto impacto. Las modificaciones más importantes se basan en el cambio de los materiales activos de los cartuchos estándar:

Primera modificación

- Se reemplazó el contenido del primer cartucho de carbón por empaque de capsulas de zeolita 3A, como etapa deshidratadora debido a su alta afinidad por moléculas de agua.

Segunda modificación

- Intercambio del carbón activado estándar por carbón dopado con cloruro férrico a concentración de 0.3 M y 0.6 M para facilitar la absorción selectiva de oxígeno molecular (O_2).

Las anteriores modificaciones pueden ser relativamente sencillas, pero incrementan notablemente las aplicaciones útiles del sistema, ya que, con la modificación adecuada, un sistema común de purificación de agua se puede convertir en un generador de nitrógeno de alta pureza para atmósfera modificad con alta aplicación en la conservación de alimentos domésticos. De igual forma, el equipo propuesto en esta investigación cuenta con un diseño práctico que facilita su replicabilidad, escalabilidad y mantenimiento, por lo tanto, es un equipo tecnológico accesible y sostenible.

1.2 Nitrógeno como agente conservador

El nitrógeno (N_2) es un gas incoloro, inodoro, inerte, no reactivo e insípido a temperatura ambiente, además constituye aproximadamente el 78% del aire atmosférico. Al desplazar el oxígeno en los recipientes como una atmósfera modificada, el nitrógeno minimiza las reacciones de oxidación y el crecimiento de microorganismos aerobios sin alterar su calidad organoléptica de los alimentos, por lo tanto, su uso en la industria alimentaria es una técnica eficaz para prolongar la vida útil de los productos y reducir el desperdicio alimentario (Pneumatech, 2024).

1.2.1 Aplicaciones en la industria alimentaria

El nitrógeno es ampliamente utilizado para el envasado en atmósfera modificada para crear un entorno que preserva la frescura de los productos.

Como primer ejemplo tenemos al café y té, a los cuales el nitrógeno evita la oxidación de sus aceites esenciales, así preservando el aroma y sabor característico del café. Solo utilizando generadores de nitrógeno in situ para crear una atmósfera modificada durante su envasado. Además, en el caso de los snacks y productos fríos previene el enranciamiento de las grasas, manteniendo la crocancia y frescura de productos como papas fritas y frutos secos.

Por otro lado, en las frutas y verduras frescas disminuye la tasa de respiración y retrasa la maduración, extendiendo la vida útil de las hortalizas, incluso con los productos lácteos minimiza la presencia de oxígeno, preserva la calidad de quesos, reduce el riesgo de crecimiento de hongos y bacterias, finalmente con las carnes y embutidos el nitrógeno ayuda a mantener el color rojo vivo, la frescura de las carnes, retardando el crecimiento bacteriano y la oxidación de lípidos.

1.2.2 Equipos comerciales y semiindustriales

El desarrollo de sistemas de generación de nitrógeno ha avanzado significativamente, permitiendo su adaptación en varios entornos como se muestra en los siguientes ejemplos:

- Generadores de nitrógeno in situ. Estos equipos permiten la producción continua de nitrógeno con purzas superiores al 99% y así eliminando la dependencia de cilindros o tanques externos.
- Sistemas PSA (Pressure Swing Adsorption). Proporcionan un suministro constante y de alta pureza, utilizando tamices moleculares para separar el nitrógeno del aire comprimido para aplicaciones alimentarias.

Estos equipos son utilizados en cafeterías y pequeñas industrias para preservar la calidad de sus productos y optimizar sus procesos de envasado.

1.2.3 Ventajas de la generación de nitrógeno in situ

La generación del nitrógeno in situ ofrece múltiples beneficios. Primero, con la seguridad y eficiencia se eliminan los riesgos asociados al manejo de cilindros de alta presión, garantizando un suministro continuo y confiable de nitrógeno. Otro beneficio importante es la reducción de costos operativos que se disminuyen los gastos asociados al suministro de nitrógeno eliminando la necesidad de adquirir y almacenar cilindros de gas. Finalmente, la generación in situ reduce la huella de carbono al evitar el transporte de cilindros y minimiza el desperdicio de alimentos mediante una mejor conservación.

1.3 Generación de nitrógeno: De la industria al entorno doméstico

Los procedimientos más eficaces para la generación de nitrógeno puro a escala industrial incluyen la adsorción por cambio de presión (PSA), el cual utiliza zeolitas o tamices moleculares para retener oxígeno selectivamente.

Otro de los procedimientos más comunes y eficaz es la separación por membranas, las cuales aprovechan la diferencia en permeabilidad de los gases, permitiendo que el nitrógeno se concentre en la corriente menos permeable (Perry & Taylor, 2020).

Uso a nivel doméstico es limitado comúnmente por factores como el consumo energético, la complejidad operativa y el costo de los equipos, por lo tanto, estas tecnologías solo han sido desarrolladas por entornos industriales.

1.3.1 Evolución tecnológica y accesibilidad

Hoy en día, es posible encontrar equipos compactos y eficientes que permiten la producción de nitrógeno in situ, así eliminando la dependencia de tanques de nitrógeno.

Este avance ha sido orientado por la estandarización de componentes, la miniaturización de sistemas y la reducción de costos, debido a que esta tecnología ha presentado una notable evolución y así pasando de ser exclusiva de la industria a poder ser aplicada en áreas semiindustriales, domésticas y rurales.

1.3.2 Componentes y funcionamiento de los generadores de nitrógeno doméstico

Un sistema común de generación de nitrógeno para uso doméstico o semiindustrial tiene los siguientes componentes:

- **Compresor de aire.** Se basa en la retención del aire atmosférico y lo comprime para su posterior tratamiento en las siguientes etapas.
- **Secador de aire.** Elimina la humedad del aire comprimido, así evitando la corrosión, el ensuciamiento y mejorando la eficacia del sistema.
- **Filtros de aire.** Separan contaminantes y partículas para asegurar la pureza de aire antes de su separación con el resto de los componentes.
- **Generador de nitrógeno.** El generador utiliza tecnologías como la adsorción por cambio de presión o en otros casos se usan membranas para separar el nitrógeno del resto de los componentes del aire.
- **Depósito de nitrógeno.** En este componente se almacena el gas generado para su uso posterior y así manteniendo una presión y flujo constantes.

El mecanismo de estos sistemas permite generar nitrógeno con purezas que varían entre el 95% y el 99.9%, dependiendo de la aplicación y de los factores ambientales.

1.3.3 Aplicación en entornos domésticos y reducción de costos con retorno de inversión

La actual accesibilidad de los generadores de nitrógeno reducidos ha expandido las posibilidades en varias áreas como son las cafeterías que utiliza el nitrógeno para inertizar envases, preservando en aroma y frescura del café. Además, las panaderías utilizan una atmósfera modificada con nitrógeno para prolongar la vida útil de los productos, manteniendo su textura y sabor. También los restaurantes aplican el uso del nitrógeno para la conservación de alimentos preparados, mejorando la logística y reduciendo el desperdicio. Finalmente, en los hogares el nitrógeno se emplea para conservar alimentos perecederos en atmósferas controladas.

Al adoptar los generadores de nitrógeno in situ se obtienen ventajas económicas significativas como el ahorro de costos operativos al quitar la necesidad de comprar y

almacenar varios cilindros de gas. En particular, el retorno de inversión tiene una variación, ya que depende del uso y consumo del generador, pero puede recuperarse en un período de 6 a 24 meses. Por último, el mantenimiento es mínimo debido a que estos sistemas requieren un mantenimiento sencillo, centrado en el reemplazo de filtros, empaques y revisiones básicas, debido a esto se reduce el costo a largo plazo.

Por lo tanto, la utilización de componentes comerciales accesibles, como sistemas de ósmosis inversa de seis etapas, permite la separación selectiva de oxígeno para la generación de nitrógeno en pequeñas cantidades y se obtiene una ventaja atractiva al poder modificar el sistema con componentes de bajo costo como es el carbón dopado y zeolitas.

1.3.4 Aprovechamiento de sistemas de ósmosis inversa de seis etapas

Se explicarán las seis etapas bajo el sistema de ósmosis inversa que comúnmente son instalados bajo tarja en zonas domesticas para ofrecer generación de nitrógeno estandarizado y accesible, pero en pequeñas cantidades.

Los sistemas son diseñados para la purificación de agua, pero bajo una serie de ligeras modificaciones con componentes como el carbón dopado y zeolita pueden permitir la separación selectiva de oxígeno.

Primera etapa, filtro de sedimentos de 5 micras, esta etapa elimina partículas sólidas como arena, óxido y sedimentos para así proteger las etapas posteriores y mejorar la calidad de agua. Segunda etapa, con el filtro de carbón activado granular (GAC) se adsorbe cloro, compuestos orgánicos y otros contaminantes que afectan el sabor y el olor del agua. Tercera etapa, filtro de carbón en bloque (CTO) nos proporciona una filtración adicional de químicos y contaminantes, así asegurando la eliminación de cloro residual con compuestos orgánicos.

Cuarta etapa, esta etapa se basa en la membrana de ósmosis inversa que elimina una amplia gama de contaminantes que incluyen metales pesados, sales y microorganismos para obtener agua casi pura. Quinta etapa, incluye un posfiltro de carbón activado en línea, el cual mejora aún más el sabor del agua, eliminando cualquier olor o sabor residual que pueda quedar. Por último, la lampara ultravioleta elimina del agua virus y bacterias para asegurar su consumo.

Debido a estas etapas y a sus componentes estandarizados, facilita la modificación por materiales con propiedades específicas para la adsorción de oxígeno como zeolitas 3A o carbón activado dopado con cloruro férrico.

Los ejemplos básicos de equipos disponibles en el mercado:

Sistema de ósmosis inversa de 6 etapas (100-400 GPD). Este equipo ofrece una membrana de alta precisión de 0.001 micrones y una lámpara UV para eliminar bacterias y virus. Incluye filtros de sedimentos, carbón activado y carbón en bloque, así como una bomba booster para optimizar el rendimiento (Alwater, s.f.).

Sistema de ósmosis de 6 etapas “ALKALIS”. El sistema incorpora un posfiltro alcalino que cambia la acidez del agua a un pH más alcalino. Fabricado con materiales de alta calidad, combina simplicidad y funcionalidad a un precio competitivo (H2agua, s.f.).

Sistema de ósmosis inversa RO-100 GPD de 6 etapas. Este equipo reduce sedimentos, sales, minerales disueltos, metales pesados, virus y bacterias. Incluye un medidor controlados de agua y un kit de conexiones para facilitar su instalación (Ecoacuática, 2024).

Hoy en día, es posible adquirir equipos de seis etapas con capacidades de 100 a 400 GPD a precios accesibles, esto facilita la aplicación en entornos domésticos y semiindustriales. Ya que los costos han sido reducidos considerablemente gracias a la estandarización de componentes y avance en la fabricación (Tramex Ambiental,2023).

1.4 Innovación tecnológica en la conservación doméstica

En esta investigación se propone el desarrollo de un sistema doméstico, accesible y eficaz que genere nitrógeno, la cuál era una herramienta que antes solo era accesible para el área industrial, pero en la tecnología actual se podrá introducir al uso doméstico y permite introducir la opción de una atmósfera modificada en el hogar.

Este sistema se ajusta con los objetivos de desarrollo sustentable de la agenda 2030, de manera precisa con el objetivo 12 llamado “Producción y consumo responsables”, también con el objetivo 13 nombrado “Acción por el clima”, estos dos objetivos en conjunto prometen disminuir las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero y reducción de residuos relacionados al desperdicio alimentario (UNEP, 2021).

La transición hacia un modelo doméstico de generación de nitrógeno para conservación de alimentos desde un equipo modificado de bajo tarja con etapas de deshumidificación con zeolita 3A, separación membranal y adsorción de oxígeno mediante carbón activado dopado con cloruro férrico implica una propuesta técnica económicamente viable.

Este proyecto presenta un ejemplo de innovación tecnológica, utilizando un sistema comercial de ósmosis inversa de bajo tarja, siendo previamente modificado para generar nitrógeno de alta pureza con fines de conservación alimentaria, con ayuda de la tecnología de atmósfera modificada que ha sido exclusiva de aplicaciones industriales, no obstante, gracias a la estandarización de componentes, disminución de costos y la disponibilidad de materiales adsorbentes, este tipo de sistemas pueden trasladarse al entorno doméstico.

1.4.1 Secuencia del proceso: Diseño adaptado y funcional

El procedimiento modificado está planificado como un tren de tratamiento modular en flujo gaseoso, utilizando aire comprimido como materia prima. La serie de operación y los componentes son los siguientes:

Compresor de diafragma

Se empleó un compresor de uso común en aerografía o aplicaciones automotrices, capaz de suministrar un flujo constante de aire a presiones adecuadas de 23 L/min a 58 psi para alimentar el sistema. Debido a su bajo ruido y costo es apto para uso doméstico.

Válvula reguladora de presión

A la salida del compresor se instala una válvula reguladora que permite ajustar y mantener una presión de operación óptima para las 3 etapas siguientes. Este control es clave para asegurar la eficiencia de los materiales adsorbentes y evitar presiones que dañen la membrana

Primera etapa “Zeolita 3A

En esta etapa se realiza la eliminación de humedad donde el aire comprimido es dirigido primero hacia un cartucho con empaque de zeolita 3A, con estructura cristalina que permite adsorber específicamente moléculas de agua, reteniendo la humedad del aire y previniendo la saturación de los materiales en etapas posteriores.

Segunda etapa “Carbón activado dopado con cloruro férrico 0.3M”

El segundo cartucho contiene carbón activado granular modificado químicamente con una solución de cloruro férrico al 0.3 M, así generando óxidos de hierro impregnados en su superficie. Este componente actúa como adsorbente selectivo de oxígeno molecular a través de mecanismos de afinidad electrónica y microporosidad aguda.

Tercera etapa “Carbón activado dopado con cloruro férrico 0.6 M”

En esta etapa se utiliza un segundo cartucho con mayor concentración de cloruro férrico al 0.6 M y es así como se refuerza la etapa de adsorción, teniendo como objetivo una mayor eliminación del oxígeno residual. Este procedimiento en secuencia mejora la retención continua y eleva la pureza del nitrógeno en la corriente.

Cuarta etapa “Membrana de ósmosis inversa

Con la membrana ULP-2012-100G con la marca ATWFS que es diseñada para purificación de agua, aprovechando el flujo gaseoso, debido a su configuración de baja presión y flujo cruzado, gracias a lo cual permite una separación de gases por diferencia de permeabilidad. Debido a que el nitrógeno es menos permeable que el oxígeno molecular y el agua, los cuales se concentran en la corriente de retención, mejorando el perfil de pureza.

Quinta etapa “Cartucho de carbón activado granular”

Para este último cartucho, se realiza un “blanqueamiento” que actúa como pulidor, eliminando residuos de compuestos volátiles no deseados y contribuye con una barrera adicional de adsorción. También, estabiliza el flujo antes de la etapa de desinfección.

Sexta etapa “Lámpara de luz ultravioleta”

En esta fase se introduce una lámpara UV que actúa como desinfectante de la corriente gaseosa, reteniendo potenciales microorganismos, contaminantes biológicos o esporas que puedan haber resistido las etapas anteriores. Este proceso no altera la composición al generar nitrógeno y garantiza la seguridad microbiológica si se aplica directamente sobre alimentos.

Las válvulas de aguja entre etapas crean un control manual preciso del flujo entre cada etapa y suministra al sistema de versatilidad operativa sin necesidad de automatización costosa, debido a que se instalan válvulas de aguja de ¼”, para así evitar picos de caudal y aislar secciones para mantenimiento sin despresurizar el sistema completo.

Valor de la innovación

La propuesta de esta investigación tecnológica es basada sobre la reingeniería estratégica de un sistema doméstico existente, a través de, una serie de modificaciones se transforma en un generador de nitrógeno de alta pureza y así aprovechando al máximo la estandarización de componentes, la disponibilidad de medios adsorbentes de bajo costo y la lógica de diseño modular, por lo que, el valor de esta propuesta no consiste en el desarrollo de nuevos materiales, sino en la reingeniería estratégica que es apta para aplicaciones en conservación de alimentos en el hogar o establecimientos de preparación industrial.

1.5 Innovación tecnológica y políticas públicas en México

Hoy en día, múltiples dependencias federales han puesto énfasis en la transferencia de conocimiento desde la academia hacia la sociedad, la aplicación de ciencia para la vida cotidiana y el desarrollo de tecnología con impacto local, además la innovación tecnológica orientada a resolver problemas sociales y ambientales ha cobrado creciente relevancia en la agenda pública mexicana y los objetivos de desarrollo sustentable para impulsar proyectos de base tecnológica que respondan a contextos comunitarios, económicos y climáticos específicos.

Desde la perspectiva federal, la política se ve reflejada en programas como los Proyectos Nacionales Estratégicos (PRONACES) y el actual Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e innovación 2023-2028, en vista de que, el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) mejora su enfoque hacia un modelo de soberanía tecnológica, que prioriza el desarrollo de soluciones accesibles, sostenibles y lógicas para fomentar la creación de tecnologías propias y la reducción de la dependencia de insumos importados.

Bajo esta perspectiva, la posibilidad de adaptar tecnologías accesibles, como sistemas de ósmosis inversa y medios adsorbentes modificados para el desarrollo de equipos domésticos de conservación de alimentos mediante generación de nitrógeno, con el fin de resolver una problemática real como el desperdicio alimentario que se alinean con los objetivos nacionales

y el potencial de la ingeniería aplicada. A fin de, mejorar la calidad de vida en los hogares urbanos y rurales.

En estados como Puebla, Jalisco y Oaxaca han comenzado a establecer programas de innovación tecnológica con enfoque territorial que han promovido iniciativas de ciencia comunitaria, talleres tecnológicos y convocatorias de apoyo social. Compuesto de proyectos que utilicen recursos locales, capacidades regionales y participación comunitaria para resolver problema como el acceso al agua, el manejo de residuos y la preservación de alimentos.

Considerando este entorno, se puede observar su potencial técnico, aunque el proyecto tenga implicaciones sociales al apoyar la economía familiar, fomentar la apropiación de tecnologías por parte de la ciudadanía y reducir el desperdicio de alimentos. En función de la propuesta el diseño, prueba e implementación de un sistema doméstico para la generación de nitrógeno a partir de un equipo modificado de bajo tarja proporciona un ejemplo replicable, viable y pertinente de innovación tecnología local.

Este tipo de proyectos no solo tiene cabida en la política pública nacional actual, sino que representan una de sus líneas prioritarias de acción, promoviendo desde la ingeniería con enfoque social, especialmente con replicabilidad regional, facilidad de implementación, bajo costo y sustentabilidad.

Capítulo 2 Marco teórico

2.1 Desperdicio de alimentos: Un problema global

El desperdicio de alimentos es un problema significativo a nivel global que afecta tanto a la seguridad alimentaria como al medio ambiente. Se estima que aproximadamente un tercio de los alimentos producidos para el consumo humano se pierde o se desperdicia a lo largo de la cadena de suministro (Gustavsson et al.,2020). En las zonas urbanas, este problema es especialmente grave, donde grandes cantidades de alimentos perecederos son desechados debido a la falta de métodos efectivos de conservación en el hogar. Este desperdicio no solo contribuye a la inseguridad alimentaria, sino que también genera emisiones de gases de efecto invernadero debido a la descomposición de los alimentos en vertederos (FAO,2022).

Siendo una de las principales preocupaciones globales, los informes más recientes confirman que cerca de 931 millones de toneladas de alimentos se desperdician anualmente. Un dato relevante es que el 61% de este desperdicio proviene de los hogares, mientras que el 26% ocurre en servicios de alimentos y el 13% en el comercio minorista (IFT) (World Economic Forum). Este desperdicio no solo incrementa los costos del manejo de residuos, sino que también agrava problemas ambientales como el cambio climático. De hecho, entre 8-10% de las emisiones globales de carbono están relacionadas con alimentos que no se consumen (World Económica Forum).

En la siguiente imagen podemos apreciar estadísticamente que México es el quinto país que más desperdicios de alimentos domésticos tiene al año con 11.98 millones de toneladas, así es como la magnitud del desperdicio de alimentos a nivel global y nacional enfatiza la necesidad de implementar medidas para reducir este desperdicio de alimentos domésticos.

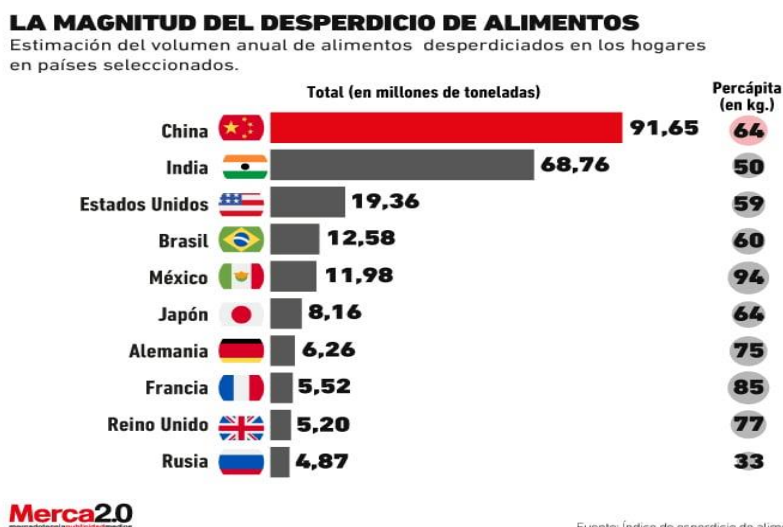


Figura 1. Merca2.0. (2021). Gráfica del día: La magnitud del desperdicio de alimentos.

Por lo tanto, el desperdicio alimentario tiene consecuencias sociales y económicas significativas. Mientras cerca de 690 millones de personas pasan hambre, el costo económico del desperdicio de alimentos asciende a aproximadamente 936 mil millones de dólares anualmente (World Economic Forum). Esta contradicción refleja la urgencia de transformar los sistemas alimentarios globales para que sean más sostenibles y equitativos.

Un aspecto positivo es que iniciativas como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU buscan reducir el desperdicio de alimentos en 50% para 2030. Aunque hay avances, los esfuerzos deben intensificarse para lograr esta ambiciosa meta (World Economic Forum).

2.2 Nitrógeno en la conservación de alimentos

El nitrógeno es un gas inerte que juega un papel crucial en la conservación de alimentos al crear una atmósfera libre de oxígeno. Esto es fundamental para reducir la oxidación de alimentos sensibles como aceites, nueces y grasas, evitando que se vuelvan rancios y pierdan sus atributos sensoriales (Khan et al., 2020). Además, el nitrógeno es eficaz para controlar el crecimiento de microorganismos aeróbicos. Que necesitan oxígeno para su metabolismo, garantizando la seguridad alimentaria y prolongando la vida útil de productos como carnes y panadería (Fellows, 2021).

2.3 Componentes de un generador de nitrógeno.

Los generadores de nitrógeno para uso doméstico incluyen varios componentes clave:

- **Compresor de aire:** Eleva la presión del aire para facilitar la separación del nitrógeno mediante las membranas.
- **Unidades de filtración:** Elimina impurezas del aire comprimido antes de la separación. Esto incluye filtros y secadores para eliminar impurezas, como polvo, partículas y humedad del aire entrante.
- **Membranas de separación:** Generalmente tubulares o de fibra hueca, utilizadas para separar el nitrógeno del aire comprimido. Estas membranas permiten la separación eficiente del nitrógeno basado en la permeabilidad diferencial de los gases (Browne et al., 2021).
- **Válvulas de control de flujo:** Estas válvulas regulan el flujo de aire comprimido y el flujo de gas rico en nitrógeno.
- **Sensores de presión:** Estos instrumentos monitorean la presión en varios puntos del sistema, asegurando un funcionamiento adecuado.

Los sistemas generadores de nitrógeno utilizan membranas selectivamente permeables de alta calidad, fabricadas comúnmente a partir de películas poliméricas o membranas de fibra hueca. El tipo de material y diseño de estas membranas varía según el fabricante y la aplicación específica para la que están destinadas.

Se deben considerar algunas características para el diseño de un sistema tamaño industrial de generación de nitrógeno a su uso doméstico:

- **Costo:** Los generadores de nitrógeno industriales pueden ser costoso debido a su tamaño y capacidad. Un sistema de uso doméstico probablemente tendría que ser más rentable.
- **Tamaño y capacidad:** Los generadores de nitrógeno industriales están diseñados para caudales y a menudo funcionan de forma continua. Es posible que una aplicación doméstica no requiera capacidad tan alta, por lo que sería necesario reducir el tamaño del sistema.
- **Instalación y mantenimiento:** Los sistemas pueden requerir instalación y mantenimiento profesionales. Un sistema de uso doméstico debería ser fácil de usar y adecuado para la instalación y el mantenimiento por parte del usuario.
- **Consideraciones de seguridad:** Los sistemas industriales pueden tener características y consideraciones de seguridad adaptadas a los entornos industriales. Un sistema doméstico tendría que priorizar la seguridad en un entorno doméstico.
- **Regulaciones y normas:** Puede haber regulaciones y normas que se apliquen al uso de equipos generadores de gas en un entorno doméstico. Su cumplimiento sería esencial.

2.4 Teoría básica de generadores de nitrógeno

Los generadores de nitrógeno basados en membranas funcionan mediante un proceso de permeación diferencial. El aire comprimido pasa a través de una membrana que permite que el nitrógeno atraviese mientras retiene otros gases como oxígeno y dióxido de carbono. Este proceso se basa en las propiedades físicas y químicas de los gases y en la tecnología avanzada de membranas desarrollada para este propósito (Perry & Taylor, 2020).

La teoría de los generadores de nitrógeno se basa en principios de gases, los cuales utilizan tecnologías avanzadas para extraer nitrógeno del aire ambiente, que contiene aproximadamente un 78% de este gas. Los generadores de nitrógeno que operan con membranas selectivas permeables funcionan al comprimir el aire y forzarlo a través de una membrana, donde los diferentes gases del aire se separan según sus velocidades de difusión. Según Perry y Taylor, las membranas poliméricas y de fibra hueca son las más utilizadas debido a su capacidad para filtrar eficientemente oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua, permitiendo obtener nitrógeno de alta pureza.

El proceso de separación está basado en la diferencia, en el tamaño y la afinidad de los gases con la membrana. El oxígeno, por ejemplo, es más pequeño y se difunde a través de la membrana más rápidamente que el nitrógeno. Este último, al ser menos permeable, se concentra en el lado de alta presión de la membrana. El control de variables como la presión y la temperatura optimiza la eficiencia de la separación.

Por otro lado, la tecnología de adsorción por cambio de presión (PSA), mencionada en el “Manual de gas y aire comprimido” de Wayne Perry y Michael C. Taylor, es otra técnica ampliamente utilizada en generadores de nitrógeno. En este caso, se aprovecha la capacidad de ciertos materiales adsorbentes, como la zeolita para retener oxígeno bajo presiones elevadas. Cuando la presión se reduce, el oxígeno es liberado permitiendo que el nitrógeno se acumule. Este ciclo de adsorción y desorción permite una producción continua de nitrógeno a niveles de pureza que pueden alcanzar hasta el 99.99%.

Una de las ventajas clave de los generadores de nitrógeno frente a otras tecnologías es su capacidad para operar in situ, es decir, pueden producir nitrógeno en el lugar de consumo sin necesidad de almacenamiento o transporte de grandes cantidades de gas comprimido. Esto los hace ideales para industrias como la farmacéutica, alimentaria, química y metalúrgica, donde la demanda de nitrógeno puede variar considerablemente.

Ambos sistemas tanto los generadores de membrana como los PSA que ofrecen una serie de ventajas como la reducción de costos operativos, la producción continua y la posibilidad de ajustar la pureza según las necesidades específicas de cada industria.

La teoría de los generadores de nitrógeno está profundamente basada en los principios de la separación de gases, ya sea mediante tecnologías de membrana o de adsorción, lo que permite aplicaciones diversas y especializadas en múltiples sectores industriales.

2.5 Aplicación doméstica del generador de nitrógeno

La adaptación de generadores de nitrógeno para uso doméstico implica modificar tecnologías industriales para hacerlas accesibles y seguras en el entorno del hogar. Esto incluye la selección de componentes adecuados, la implementación de sistemas de control accesibles y la integración de medidas de seguridad para proteger a los usuarios. La capacidad de utilizar nitrógeno para prolongar la vida útil de los alimentos en cas ofrece una alternativa a los conservadores químicos y ayuda a reducir el desperdicio alimentario (Khan et al., 2020).

2.6 Normatividad aplicable del nitrógeno para la conservación de alimentos y regulaciones en México

El uso de nitrógeno a menudo se rige por regulaciones de calidad y seguridad alimentaria en lugar de regulaciones específicas centradas únicamente en nitrógeno. Las regulaciones relacionadas con el uso del nitrógeno en el procesamiento de alimentos generalmente giran en torno a garantizar que su aplicación no comprometa la seguridad o calidad de los alimentos.

Es esencial que los procesadores de alimentos cumplan con las normas pertinentes de seguridad alimentaria, incluidas aquellas relacionadas con el uso de gases como el nitrógeno, para garantizar la seguridad y la calidad de sus productos.

En el caso de México deben seguirse las normas mexicanas que se encuentran relacionadas con las buenas prácticas de higiene y la calidad de sus productos. Estas normativas son las siguientes:

NOM-003-SCFI-2014 Productos eléctricos-Especificaciones de seguridad.

Esta norma regula la seguridad de los aparatos eléctricos utilizados en México. Aunque el generador de nitrógeno no es un aparato exclusivamente eléctrico, este tipo de norma aplica para componentes como los compresores otros sistemas electrónicos que conforman el equipo con el objetivo de prevenir peligros para los consumidores.

NOM-251-SSA1-2009 Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios.

Regula los requisitos sanitarios para el proceso de alimentos y bebidas, incluyendo la conservación y almacenamiento. Asegura que los sistemas de nitrógeno no comprometan la seguridad alimentaria, manteniendo la integridad de los productos, En el caso específico de la modificación del equipo no es directamente aplicable, sin embargo, es aplicable por la destinación del nitrógeno a alimentos domésticos.

Además de las normativas nacionales, relevante considerar algunas normativas internacionales que establecen estándares sobre la calidad del aire y gases comprimidos utilizados en la conservación de alimentos, como la ISO 8573-1, ya que esta norma regula los niveles de pureza y contaminantes en sistemas de aire comprimido, lo que es crucial para asegurar que el nitrógeno producido por el generador cumpla con los estándares requeridos para la conservación de alimentos en condiciones óptimas.

Estas normativas aseguran que el uso de nitrógeno en la conservación de alimentos cumpla con los estándares de seguridad, calidad y eficacia, protegiendo tanto a los consumidores como al medio ambiente.

2.7 Instrumentación de generadores de nitrógeno

La instrumentación en un generador de nitrógeno es crucial para asegurar un funcionamiento eficiente y seguro. La instrumentación específica puede variar según el tipo y la complejidad del sistema generador de nitrógeno, pero los componentes comunes incluyen:

- **Sensores de presión y temperatura:** Monitorean las condiciones operativas de sistema para garantizar que se mantengan dentro de los rangos óptimos.
- **Controladores automáticos:** Ajustan los parámetros operativos como el flujo de aire y la presión para mantener la pureza del nitrógeno.
- **Sistema de alarma y mecanismos de emergencia:** Detectan fallos en el sistema y activan procedimientos de emergencia para evitar daños o riesgos para la seguridad (Perry & Taylor, 2020).

- **Compresor de aire:** Muchos generadores de nitrógeno in situ requieren un compresor de aire para suministrarle aire comprimido, que es la materia prima para el proceso de generación de nitrógeno. El compresor puede tener instrumentación para monitorear la presión, la temperatura y los caudales.
- **Sistemas de filtración:** Se utiliza un sistema de filtración para eliminar contaminantes, como polvo, partículas y humedad, del aire entrante. Puede incluir manómetros y filtros con indicadores de presión diferencial.
- **Torres de adsorción** (para generadores de PSA): En un generador de nitrógeno de adsorción por cambio de presión (PSA), las torres de adsorción contienen material de tamiz molecular. Se pueden utilizar instrumentos como sensores de presión y sensores de temperatura para monitorear las condiciones dentro de las torres.
- **Módulos de membrana** (para generadores de membrana): En un generador de nitrógeno de membrana, los módulos de membrana son componentes críticos. Los instrumentos para controlar la presión, la temperatura y los caudales en el sistema de membranas garantizan una separación adecuada de los gases.
- **Válvulas de conmutación** (para generadores de PSA): Los sistemas PSA utilizan válvulas de conmutación para alternar el flujo de aire entre las torres de adsorción. Estas válvulas están controladas por un sistema de control que puede incluir sensores y mecanismos de retroalimentación.
- **Analizador de pureza de nitrógeno:** Para garantizar que el nitrógeno cumpla con las especificaciones de pureza requeridas, a menudo se incluye un analizador de pureza de nitrógeno en el sistema. Monitorea continuamente la pureza del nitrógeno y puede proporcionar retroalimentación para el control del sistema.
- **Medidores de flujo:** Los medidores de flujo se utilizan para medir los caudales tanto de la materia prima de aire comprimido como del gas nitrógeno generado.
- **Sistemas de control:** El sistema de control supervisa el funcionamiento del generador de nitrógeno, las válvulas reguladoras, las torres de conmutación (para PSA) y otros componentes para mantener la pureza y los caudales de nitrógeno deseados. A menudo incluye una interfaz hombre-maquina (HMI) para la interacción y el monitoreo del usuario.
- **Almacenamiento de nitrógeno:** Si el nitrógeno se almacena para su uso posterior, se puede incluir instrumentación para monitorear la presión o temperaturas excesivas.

La instrumentación y los componentes específicos de un generador de nitrógeno in situ pueden variar según el fabricante, el modelo y la aplicación. El mantenimiento y monitoreo adecuados de estos instrumentos son esenciales para garantizar el funcionamiento confiable y eficiente del generador.

2.8 Dopado de carbón activado con cloruro férrico

El método de dopado del carbón activado con cloruro férrico (FeCl_3) es un método investigado para mejorar las propiedades adsorbentes y catalíticas del carbón activado. Este

proceso implica la impregnación del material con cloruro férrico, lo que modifica su química superficial, carga eléctrica y estructura porosa, aumentando así su eficiencia en la eliminación de contaminantes como el arsénico, metales pesados y compuestos orgánicos.

El carbón activado es un material altamente poroso con una superficie específica elevada, lo que lo hace ideal para aplicaciones en tratamiento de aguas, purificación de aire y almacenamiento de energía. Sin embargo, su capacidad de adsorción de especies inorgánicas como el arsénico es limitada debido a la falta de grupos funcionales adecuados. La impregnación con FeCl_3 introduce sitios activos adicionales que mejoran la retención de iones metálicos y oxianiones en solución acuosa (Amparán Ochoa, 2007, p. 57).

Efectos del dopado con cloruro férrico

La modificación de la química superficial mediante la impregnación con cloruro férrico cambia superficialmente el carbón activado mejorando sus características, las cuales pueden ser las siguientes.

Generación de óxidos de hierro identificando las fases cristalinas como gethita y magnetita, ambas con alta capacidad adsorbente (González Navarrete, 2017, p.76).

Aumento en la hidrofobicidad mediante una previa oxidación con KMnO_4 o HNO_3 generando grupos carboxílicos y fenólicos facilitando la dispersión y fijación del hierro en la superficie del carbón (Amparán Ochoa, 2007, p.7).

Intercambio en el punto de carga cero, con la impregnación con cloruro férrico ajusta el pH del carbón, permitiendo su utilización en una mayor diversidad de condiciones de pH. (Román, 2020, p.49).

Uno de los mayores efectos es la adsorción de contaminantes, el arsénico se logra remover hasta un 95% de arseniato y otros componentes en solución acuosa, ampliando el rendimiento del carbón activado convencional. Además, se obtiene un mayor rango de pH y una captura de fármacos y contaminantes orgánicos.

2.9 Método de preparación y optimización

Primero se lleva a cabo una impregnación con cloruro férrico en solución acuosa según la concentración del cloruro férrico, dejando mezclar por 24 horas y a temperatura ambiente, seguido de un lavado con suficiente agua destilada hasta obtener un pH aproximado de 7, en su defecto agregar solución de hidróxido de sodio (NaOH) para ajustar el pH, para después filtrar y pesar todo el carbón activado.

Posteriormente se llevará a cabo un secado en el equipo “Horno de secado” durante 2 horas a 120°C para evaporar toda el agua aun disponible en el carbón activado, seguido de una calcinación durante 4 horas a una temperatura de 450°C en el equipo “Mufla”, de la misma manera, se pesa y contabiliza el carbón activado dopado con cloruro férrico.

En conclusión, al dopar el carbón activado con cloruro férrico tiene mayor efectividad en sus capacidades de adsorción y catálisis, haciéndolo ideal para aplicaciones en tratamientos de agua y remediación ambiental.

2.10 Impacto ambiental, económico y social del generador de nitrógeno en el hogar.

Un generador casero puede presentar aspectos, positivos y negativos. Es importante considerarlos, tales como accesibilidad, costo y posibles implicaciones para fabricantes o usuarios.

Impacto ambiental: La implementación de generadores de nitrógeno en el hogar puede contribuir significativamente a la reducción del desperdicio alimentarios. Al prolongar la vida útil de los alimentos, se disminuye la cantidad de residuos generados y, por ende, las emisiones de gases de efectos invernadero asociadas con la descomposición de alimentos en vertederos. Además, el uso de nitrógeno como alternativa a los conservantes químicos reduce el impacto ambiental de estos aditivos en el ecosistema (Smith et al, 2022).

Impacto económico: Desde una perspectiva económica, el uso doméstico de generadores de nitrógeno puede llevar a una reducción en el gasto en alimentos, ya que los productos que se conservan durante períodos más largos y se minimiza la necesidad de reemplazarlos. A largo plazo, la inversión en un generador de nitrógeno puede resultar en ahorros significativos, además de contribuir a una mayor sostenibilidad y eficiencia en el uso de recursos alimentarios (Jones & Williams, 2021).

Impactos sociales positivos:

1. **Conservación y acceso a los alimentos:** Permitiría a las personas extender la vida útil de los alimentos perecederos, esto implicaría reducir el desperdicio de alimentos y mejorar el acceso a ellos.
2. **Empoderamiento local:** Si fuera rentable y de fabricación local, puede empoderar económicamente a personas o comunidades al proporcionar un medio de conservación de alimentos sin depender de proveedores externos.
3. **Agricultura en pequeña escala y economías locales:** Los pequeños agricultores y los productores de alimentos locales pueden beneficiarse de métodos mejorados de conservación de alimentos.
4. **Educación:** El desarrollo y uso puede brindar oportunidades para la educación y el desarrollo de habilidades en la ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas, fomentando la innovación.
5. **Dependencia de recursos locales:** Si dependiera en gran medida de los recursos locales, podría limitar la escalabilidad y adaptabilidad en regiones con variabilidad de recursos.

Aunque un generador puede tener efectos sociales positivos, como la preservación de alimentos y el empoderamiento local, también suscita inquietudes sobre seguridad, habilidades técnicas, medio ambiente y accesibilidad. Es esencial abordar estos desafíos a través de educación, capacitación y cumplimiento de estándares de seguridad para maximizar los resultados positivos y minimizar los negativos.

Capítulo 3 Metodología

La metodología de este trabajo de tesis es de tipo experimental y aplicada, debido a que se modifica un equipo comercial para evaluar su desempeño en condiciones específicas.

Lo que aquí se presenta es realizar la modificación de un equipo comercial de ultrafiltración con el objetivo de generar nitrógeno a partir de aire comprimido, modificando su funcionalidad y su estructura física. Mediante la modificación de atmósfera se evaluará la efectividad en la conservación de alimentos de forma doméstica.

En palabras de Hernández et al. (2014), la investigación experimental “se lleva a cabo cuando se manipulan deliberadamente una o más variables independientes para observar el efecto que tiene esta manipulación sobre una o más variables dependientes para observar el efecto que tiene esta manipulación sobre una o más variables dependientes en una situación controlada”.

En esta investigación, nuestra variable dependiente será la productividad en la generación de nitrógeno y su efectividad en la conservación de alimentos.

Según Sampieri et al. (2014), la investigación “se realiza con el propósito de aplicar los conocimientos adquiridos para resolver problemas específicos de la vida real”. Por lo tanto, esta propuesta es una investigación aplicada a causa de que su finalidad es la reducción del desperdicio de alimentos en el hogar con un equipo accesible y sustentable, lo cual resuelve un problema práctico específico.

El diseño de esta modificación es un diseño experimental de laboratorio, el cual se hará analizando y comparando el comportamiento del equipo antes y después de su modificación, implicando que todas las pruebas se realizarán con condiciones controladas garantizando la reproducibilidad y validez de la evaluación. Para así poder determinar la pureza del nitrógeno y medir la eficiencia para conservar los alimentos en un tiempo determinado.

3.1 Materiales, equipo e insumos

Esta investigación experimental se basa en obtener un acceso fácil y un costo accesible para los hogares, por lo tanto, se decidió utilizar materiales, equipos e insumos de bajo costo para modificar el sistema doméstico de ultrafiltración para la generación de nitrógeno para usar en la conservación de alimentos. Y es así como las herramientas utilizadas se describen según su función en el procedimiento.

Materiales y reactivos

Esta serie de materiales y reactivos se utilizaron para la modificación del sistema, tratando siempre de economizar para un equipo accesible.

- Carbón activado granular (Tamaño de partícula entre 0.5 y 2 mm).

- Solución de cloruro férrico(FeCl_3) al 40%, preparada con agua destilada, marca Steren.
- Zeolita 3A (Forma esférica).
- Etanol al 96% (Empleado para limpieza y secado del adsorbente modificado).
- Agua destilada.
- Pan blanco comercial (Utilizado para pruebas).
- Bolsas originales del pan.
- Recipiente hermético de grado alimenticio con adaptaciones de válvulas para la inyección de gas.

Equipos e instrumentos

- Sistema de ultrafiltración doméstico marca Evans.
- Membrana de ósmosis inversa, tipo enrollado en espiral, incorporada al sistema modificado.
- Cartuchos rellenables con carbón dopado y zeolita (Marca Evans).
- Compresor de aire tipo aerógrafo marca Truper (Presión de salida aproximada de 30 psi).
- Oxímetro de pulso con sensor adaptado al flujo de aire, utilizado como indicador indirecto de la concentración de oxígeno.
- Mantilla eléctrica (Utilizada para el secado del carbón modificado).
- Agitador magnético.
- Válvulas de aguja para la regulación del flujo de aire.
- Mangueras de plástico de conexión tipo tubing de grado alimenticio.
- Vasos de precipitado de 250 y 500 ml.
- Báscula digital con sensibilidad de ± 0.01 g.

Herramienta de análisis

- Microsoft Excel 365, utilizado para procesamiento de datos, registro de resultados y generación de gráficos.

No se utilizaron sistemas de automatización ni software de programación, debido a que el diseño del equipo es completamente manual y orientado a su uso doméstico.

3.2 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental de esta investigación es sustentado en la modificación de un sistema de purificación comercial de ultrafiltración mediante la membrana de ósmosis inversa de modelo ULP-2012-100G, la cual fue elegida por la capacidad de separación más eficiente de gases, ya que permite una separación más exigente y práctica para disminuir el oxígeno del nitrógeno en el aire comprimido. Esta modificación es fundamental para el

proceso de la generación de nitrógeno para la aplicación en conservación de alimentos mediante atmósfera modificada.

El funcionamiento del sistema es representado en el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) presentado en el Anexo 1, en el cual detalla los equipos, instrumentos y válvulas del equipo generador de nitrógeno. Este DTI también presenta el arreglo de componentes y la lógica de operación del sistema.

Compresión y acondicionamiento del aire

El aire comprimido entra al equipo mediante el compresor (M-101), para suministrar el flujo de aire presurizado necesario en la corriente del tren de tratamiento. Después el aire comprimido pasa por el filtro 1 de Zeolita 3A (T-201), el cual adsorbe la humedad, al mismo tiempo que reduce el contenido de vapor de agua. Este filtro es esencial debido a que la presencia de humedad en el equipo puede disminuir la vida útil de la membrana de ósmosis inversa y también afecta las etapas posteriores.

Etapas de reducción de oxígeno mediante absorción

Posteriormente, con el fluido deshidratado, este atraviesa dos filtros de adsorción en serie, el primer filtro (T-301) fue rellanado con carbón activado dopado de cloruro férrico con una concentración de 0.3 m. En el segundo filtro (T-302) también fue rellanado con carbón activado dopado a una concentración de 0.6 M, así se garantiza una disminución mayor antes de la separación por membrana, mejora la capacidad de captura de oxígeno y facilita la reducción inicial en serie. Los filtros anteriores están equipados con sensores de oxígeno (OIT-102 Y OIT-103) los cuales monitorean la concentración O_2 en la salida de cada absorbedor para asegurar el control preciso.

Separación por membrana de ósmosis inversa

La siguiente etapa es introducir la corriente parcialmente nitrogenada a la membrana de ósmosis inversa (T-401), esta membrana funciona en base al separar las moléculas de oxígeno con mayor afinidad y así permitir el paso del nitrógeno hacia el flujo permeado. Esta etapa se controla con válvulas de aguja (HV-104, HV-105, HV-106) que regulan el permeado de N_2 y el rechazo con mayor contenido de O_2 . Al final se coloca un sensor de presión diferencial (DPIT-104) para indicar la caída de presión entre la entrada y salida, así evaluando el desempeño de la membrana y detectar posibles ensuciamientos.

Purificación final y esterilización

La corriente pasa por un filtro de carbón activado granular (T-501) para eliminar compuestos residuales o impurezas sobrantes, posteriormente la corriente de gas se expone a una lámpara ultravioleta (T-601) asegurando la esterilización y la inactivación de posibles microorganismos y finalmente entregar una corriente de salida de nitrógeno limpio y seguro para el contacto con alimentos.

Instrumentación y control manual

El equipo fue diseñado para uso a nivel doméstico y validando en tiempo real las condiciones del proceso con una serie de instrumentos.

Adicionalmente se colocaron válvulas de aguja en puntos estratégicos, así garantizando una operación flexible y ajustable a las necesidades experimentales. En conjunto el DTI detalla de manera lógica el funcionamiento del sistema.

Con lo anteriormente descrito se explica el cambio de membrana a ósmosis inversa y la disposición de cada componente para asegurar la producción de flujo de nitrógeno bajo condiciones replicables a nivel doméstico.

3.2.1 Dopado del carbón activado con cloruro férrico

El objetivo del dopado fue modificar la superficie y mejorar la funcionalidad del carbón activado, se hicieron dos dopados con solución de cloruro férrico (FeCl_3) al 40% con diferente concentración, la primera con 0.3 M y la segunda con 0.6 M para obtener un volumen final total de 1.2 L por cada dopado.

Para obtener la cantidad de soluto se utilizaron los siguientes datos:

Datos Base para 0.3 M

- Concentración requerida de FeCl_3 : 0.3 M
- Volumen final de solución requerida: 1.2 L
- Masa molar de FeCl_3 : 162.2 g/mol
- Concentración de FeCl_3 al 40%: 0.58 g/ml

Datos Base para 0.6 M

- Concentración requerida de FeCl_3 : 0.6 M
- Volumen final de solución requerida: 1.2 L
- Masa molar de FeCl_3 : 162.2 g/mol
- Concentración de FeCl_3 al 40%: 1.16 g/ml

3.2.2 Preparación de las soluciones de FeCl_3

La solución base empleada contiene un 40% de cloruro férrico en masa, eso quiere decir que, hay 400g de FeCl_3 por cada 1000g de solución y suponiendo 1.4 g/ml de densidad aproximada.

Cálculo de la masa molar de FeCl_3

$$\text{Masa molar de } \text{FeCl}_3 = \text{Masa molar de Fe} + 3(\text{Masa molar de Cl})$$

$$\text{Masa molar de } \text{FeCl}_3 = 55.845 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 35.453 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{Masa molar de FeCl}_3 = 162.2 \frac{g}{mol}$$

Cálculo de la masa molar de FeCl₃

Para la solución de 0.3 M

$$n = M * V$$

$$\left(0.3 \frac{mol}{L}\right) (1.2 L) = 0.36 mol$$

$$\text{Masa de soluto (m)} = n * MM$$

$$(0.36 mol) \left(162.2 \frac{g}{mol}\right) = 58.39 g$$

Para la solución de 0.6 M

$$n = M * V$$

$$\left(0.6 \frac{mol}{L}\right) (1.2 L) = 0.72 mol$$

$$\text{Masa de soluto (m)} = n * MM$$

$$(0.72 mol) \left(162.2 \frac{g}{mol}\right) = 116.78 g$$

Cálculo del volumen de solución base necesaria

Sabiendo que la concentración total de FeCl₃ al 40% es:

$$\left(0.4 \frac{g}{g \text{ de solución}}\right) \left(1.45 \frac{g}{mL}\right) = 0.58 \frac{g \text{ de FeCl}_3}{mL}$$

Para calcular el volumen de solución base:

$$V = \frac{\text{masa de soluto}}{\text{Concentración total de FeCl}_3}$$

Entonces para 0.3 M:

$$V = \frac{58.39 g}{0.58 \frac{g}{mL}}$$

$$V = 100.67 mL$$

Entonces para 0.6 M:

$$V = \frac{116.78 \text{ g}}{0.58 \frac{\text{g}}{\text{mL}}}$$

$$V = 201.34 \text{ mL}$$

Para preparar las soluciones se utilizaron dos matraces aforados (jarras) y se midieron los volúmenes calculados anteriormente para la solución base, después se completó el total de 1.2 L con agua destilada. Por último, ambas soluciones se agitaron manualmente hasta lograr una mezcla homogénea.

Impregnación del carbón activado

Para cada solución de dopado de carbón activado se pesaron porciones iguales de 300g de carbón activado proveniente de los cartuchos del equipo de ultrafiltración, se colocaron en vasos precipitados individuales, posteriormente fue sumergido y mezclado completamente en las soluciones y se dejó reposar durante 24 horas bajo agitación constante sobre una mantilla eléctrica a temperatura ambiente.



Figura 2. Carbón activado reposando en la solución de cloruro férrico.

3.3 Secado y pesado del carbón activado

Después de las 24 horas transcurridas, se decantó el líquido excedente, después se realizó un enjuague con al menos 1.5 L e agua destilada y el carbón fue colocado sobre recipientes de PVC para evitar oxidación y se dejó secar a temperatura ambiente por 3 días.

Posteriormente, el carbón activado dopado fue pesado en peso húmedo en una báscula digital para poder ser colocado en recipientes de vidrio resistentes a temperaturas mayores a 350°C.

Primero se colocaron ambas muestras en una mufla a una temperatura de 120°C durante 3 horas para un secado completo y por último se aumentó la temperatura a 300°C durante 2 horas para la calcinación del carbón activado dopado, además para lograr estabilizar el óxido de hierro en la estructura de carbón activado y así facilitar su reutilización.

Finalmente, se volvió a pesar el carbón activado dopado, pero en esta ocasión en su peso seco y a continuación se muestra una tabla de comparación entre peso inicial, peso húmedo y peso seco para obtener la pérdida de materia en peso.

Muestra	Peso inicial (g)	Peso húmedo (g)	Peso final (Seco) (g)	Pérdida de materia (g)
0.3 M	300 g	480 g	248 g	52 g
0.6 M	300 g	592 g	258 g	42 g

Tabla 1. Comparación entre el peso inicial, peso húmedo y peso final.

El carbón activado dopado seco se almacenó inmediatamente en los cartuchos 2 y 3, ya proporcionados en el equipo, así sustituyendo el empaque de estos y después se cerraron completamente.

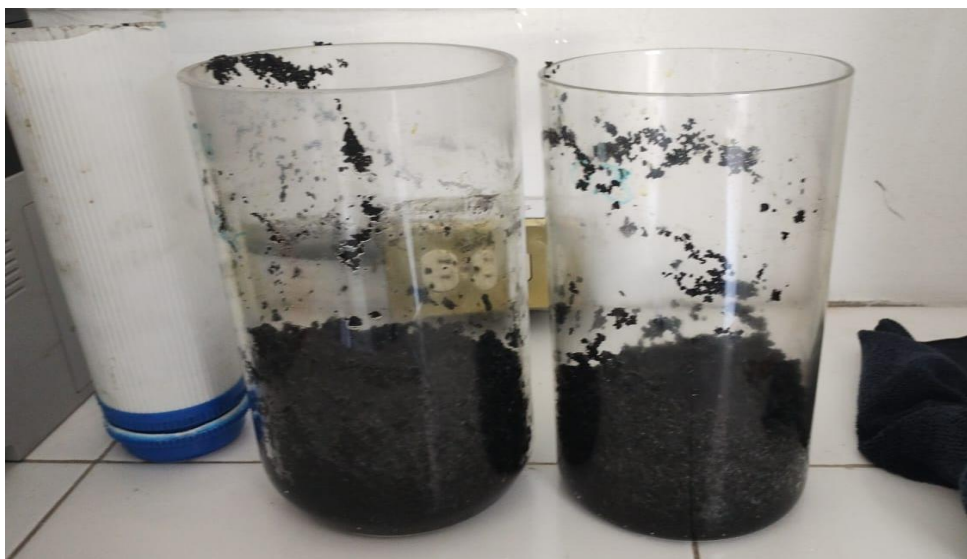


Figura 3. Carbón activado dopado con cloruro férrico después del lavado con agua destilada.



Figura 4. Carbón activado dopado con cloruro férrico secado a temperatura ambiente a 0.3 M.



Figura 5. Carbón activado dopado con cloruro férrico secado a temperatura ambiente a 0.6 M.

3.3.1 Secado y activación de la zeolita 3A

La zeolita 3A tiene que ser previamente activada térmicamente para su utilización en el sistema, así se garantiza que la zeolita se encuentre activado y tenga la capacidad de absorber humedad residual en el flujo de aire.

Primero se pesó un total de 600 g de zeolita 3A, se colocó en un vaso precipitado y se introdujo en una mufla a 300°C durante 2 horas y 30 minutos, después se dejó enfriar para

ser pesada en una báscula digital, obteniendo 512 g. Finalmente, se utilizaron 257 g para remplazar el empaque del primer cartucho.



Figura 6. Zeolita 3A posteriormente activada y pesada.

3.4 Montaje de cartuchos rellenables en el equipo

Posteriormente completado el dopado del carbón activado y la activación de la zeolita 3A, estos materiales fueron colocados dentro de los cartuchos rellenables, en el cartucho 1 se agregó 257g de zeolita 3A activada para absorber toda la humedad posible en el aire comprimido, en el siguiente cartucho se colocó 248 g de carbón activado dopado con 0.3 M de concentración para una mejor absorción del oxígeno y en el último cartucho se insertó 248 g de carbón activado dopado con 0.6 M de concentración.

Estos cartuchos sustituyeron los empaques originales y fueron sellados completamente, después se instalaron en serie antes de la membrana de ósmosis inversa, debido a que su función está en la etapa de pretratamiento y optimizar la eliminación de oxígeno antes de la separación por la membrana de ósmosis inversa.

3.5 Arreglo de conexión y suministro de aire

Para la alimentación de aire al equipo, se incorporó un compresor para aerógrafo marca Truper de 1/5 Hp y 58 Psi. Se conectó mediante una manguera tipo tubing, una válvula de aguja y un conjunto de arreglos de conexiones en T y codos PVC, de este modo se permitió un mejor control de flujo para los diferentes cartuchos y membranas.

3.5.1 Válvulas instaladas

El sistema fue instalado con válvulas de aguja colocadas antes y después de cada componente como el compresor, cartuchos rellenables, membranas de ósmosis inversa, lámpara UV y la línea de salida hacia el oxímetro, esto se realizó debido a que las válvulas permitieron un control de flujo más preciso, un mejor llenado de los cartuchos y el aislamiento de cada componente para realizar mantenimiento del equipo.

Para un funcionamiento adecuado se estableció una rutina de apertura y cierre de válvulas de aguja, según el orden de cada etapa del equipo para permitir la presión dentro de sus límites operativos del compresor y evitar pérdida de fluidos.

3.5.2 Tiempo de operación

Cada prueba del sistema era de 5 minutos con 20 minutos de descanso, debido a limitaciones de humedad y térmica de compresor, se permitió enfriamiento entre ciclos y en casos extremos el compresor se apaga automáticamente al sobrecalentarse el motor, además se regulaba el flujo manualmente.

3.6 Medición con oxímetro

Debido a que el costo alto de un medidor de pureza de nitrógeno, se utilizó el oxímetro portátil marca Intel Instruments Pro con sensor de aire, que fue instalado en la corriente de salida del sistema, esta corriente posterior a la membrana de ósmosis inversa pasa por una lámpara UV y se después hacía el punto de muestreo.

Para así poder medir la concentración de nitrógeno indirectamente con la medición de oxígeno y usar la ley de Dalton de presiones parciales y el principio de conservación de volumen.

La ley de Dalton es la siguiente:

$$P_{atm} = P_{O_2} + P_{N_2} + P_{otros}$$

Se obtiene el valor de P_{O_2} y se puede suponer el aumento de P_{N_2} .

Análisis de datos

El análisis de datos tuvo como propósito evaluar el funcionamiento del sistema doméstico de generación de nitrógeno, así como su impacto en la conservación del pan blanco comercial. Se enfocó en dos variables principales: la estimación del contenido de nitrógeno en la corriente de salida y la comparación visual al final del periodo de conservación entre las muestras.

3.7 Estimación del contenido de nitrógeno

Dado que el sistema no cuenta con un medidor directo de nitrógeno, se utilizó un oxímetro con sensor por aire para registrar la concentración de oxígeno en la corriente de salida. A partir de este valor, se estimó el porcentaje de nitrógeno mediante la ley de Dalton de las presiones parciales bajo la suposición de que el aire está compuesto predominantemente por nitrógeno y oxígeno:

Ley de Dalton de las presiones parciales

$$\%N_2 = 100\% - \%O_2$$

Es decir, si el oxímetro reportaba un 4.5 % de oxígeno, se consideraba que el gas restante era 95.5 % nitrógeno. Este valor permitió verificar que el sistema estaba generando una corriente rica en nitrógeno adecuada para su uso en atmósferas modificadas.

3.8 Creación del modelo 3D

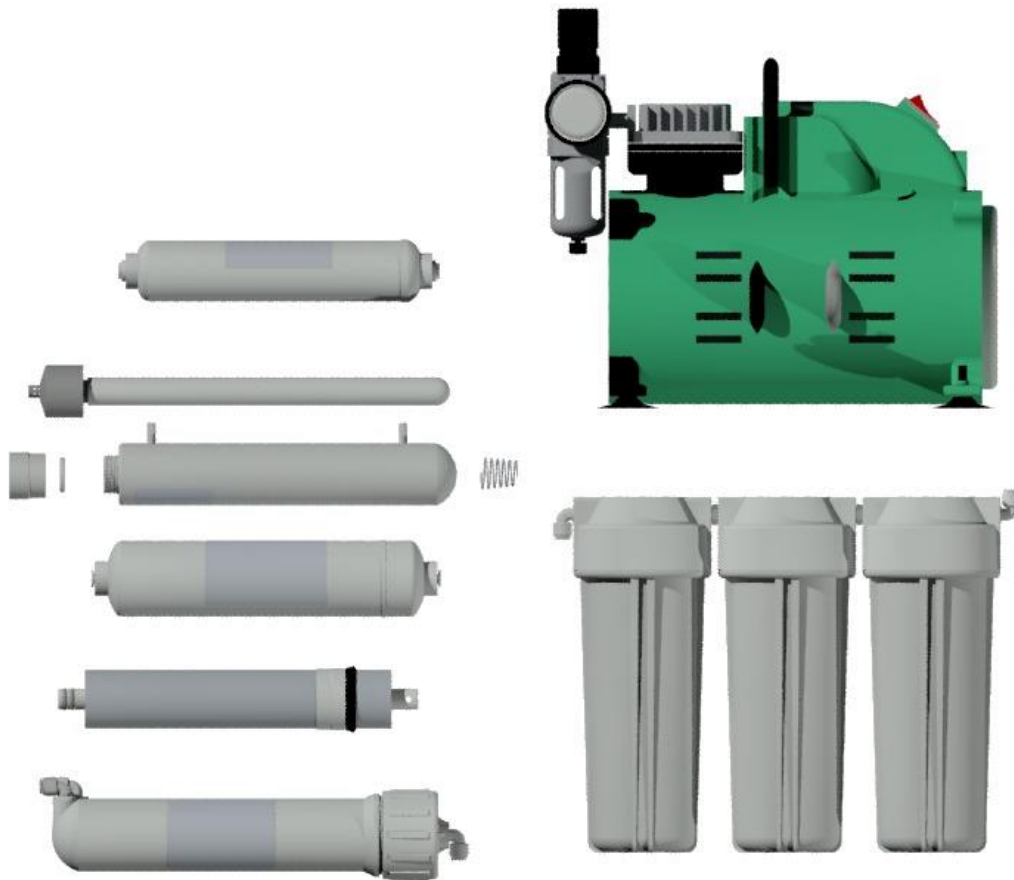


Figura 7. Modelo 3D inicial.

Se elaboró un modelo 3D en el programa AutoCAD (Figura 7.) con la finalidad de poder realizar una planeación más detallada sobre las necesidades que requerirá la adecuación del

equipo y poder contar con un listado de los elementos que incidirán en la modificación de la unidad de proceso.

3.9 Evaluación de la conservación del alimento

El propósito es determinar la efectividad del sistema de generación de nitrógeno en la conservación de alimentos, pero debido al tiempo, la adaptación del recipiente y para no aumentar el costo. Se realizaron tres pruebas independientes utilizando pan blanco comercial comprado el 1 de julio del 2025 con fecha de caducidad para el 9 de julio del 2025.

Considerando que las tres muestras se almacenaran a temperatura ambiente durante 1 mes, del 4 de julio al 4 de agosto con el fin de simular el entorno doméstico habitual. Estas muestras fueron utilizadas del mismo empaque de pan y se colocaron con completa inocuidad en cada muestra.

Muestra 1. Esta es una muestra de control, fue mantenida en su empaque original con 8 rebanadas de pan blanco para observar el deterioro ambiental natural del pan comercial bajo condiciones normales de almacenamiento doméstico sin modificaciones ni exposición a corriente de gas.

Muestra 2. Se conservó en la misma bolsa de origen, se introdujeron 8 rebanadas de pan blanco, se inyectó una corriente de nitrógeno generado por el sistema experimental durante un lapso de 1 minuto debido a la capacidad del compresor y en esta prueba se buscó desplazar el oxígeno del interior del empaque y generar una atmósfera modificada.

Muestra 3. Se colocaron 8 rebanadas en un recipiente hermético de grado alimenticio con adaptaciones de válvula de seguridad con resorte para despachar el oxígeno y con una entrada para inyectar el gas. El interior del recipiente fue purgado con la corriente de nitrógeno y con un tiempo de exposición de 1 minuto, para esta prueba se busca mejorar el sellado y la retención de gas asegurando un ambiente con mayor permanencia del nitrógeno.



Figura 8. Representación de las 3 muestras de la evaluación de la conservación de alimentos.



Figura 9. Representación de las 3 muestras de la evaluación de la conservación de alimentos.

Capítulo 4 Resultados y discusión

4.1 Diagrama de flujo general del proceso

La secuencia lógica de etapas se diseñó para permitir el acondicionamiento, separación y purificación del aire de la corriente de alimentación, finalmente obteniendo un flujo de gas con la pureza requerida en el proceso de generación de nitrógeno para conservación de alimentos.

Con el siguiente diagrama de flujo general se explica la secuencia lógica en estructura de seis pasos principales:

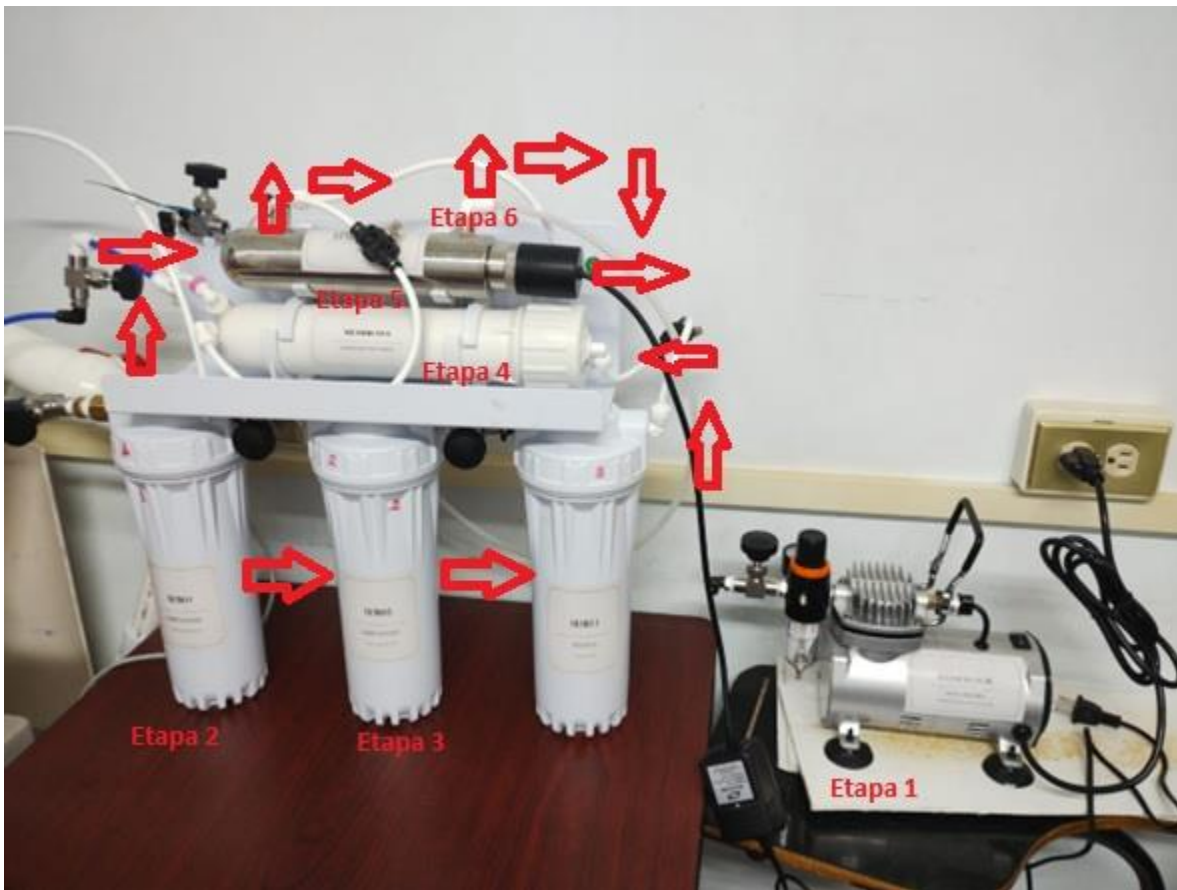


Figura 10. Diagrama básico del equipo final.

Etapa 1. Compresión de aire

El compresor de aire ingresa por la primera corriente suministrando la presión necesaria de 3 Bar para impulsar la corriente a lo largo del tren de entrenamiento contando con todas las especificaciones técnicas descritas en esta investigación.

Etapa 2. Eliminación de humedad

Después de la etapa 1, el flujo de aire pasa por el primer cartucho con empaque de zeolita 3A, el cual adsorbe vapor de agua y reduce la humedad gracias a su material micro poroso, así mismo con esta operación protege la membrana de ósmosis inversa y genera un desempeño excelente.

Etapa 3. Reducción de oxígeno por adsorción química

Esta etapa se compone por dos etapas de adsorción mediante carbón activado dopado con cloruro férrico a una concentración de 0.3 M y 0.6 M. En este caso hay una pérdida de presión de alrededor de ½ Bar, debido a que el oxígeno es reducido parcialmente, permitiendo así llegar a la membrana con un flujo enriquecido en nitrógeno.

Etapa 4. Separación por membrana de ósmosis inversa

La corriente de flujo enriquecido en nitrógeno se conduce hacia la membrana ULP-2012-100G, la cual es una etapa principal en el proceso, por lo tanto, la membrana realiza una separación selectiva de gases para aumentar la fracción molar de nitrógeno en el flujo de permeado.

Etapa 5. Purificación final

El flujo de gas entra a un cartucho de carbón granulado para mejorar la calidad de nitrógeno eliminando impurezas residuales y compuestos sobrantes.

Etapa 6. Esterilización del flujo de nitrógeno

Por último, la corriente de gas se dirige a una lámpara ultravioleta, así garantizando la inocuidad del nitrógeno, ya que la lámpara UV actúa como barrera microbiológica aplicada en conservación de alimentos.

El diagrama anterior se pudo demostrar que, iniciando desde un flujo de aire comprimido hasta su transformación a nitrógeno apto para pruebas de conservación, asegurando así una purificación y preparación a la pureza del nitrógeno obtenido.

4.1.1 Esquema del sistema modificado (DTI) indicando cada etapa y su función.

En el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI), incluido en los anexos permite visualizar con detalle, no solo los equipos principales que componen el tren de tratamiento, también la disposición de válvulas e instrumentos para hacer el equipo replicable a nivel doméstico.

Se explicará cada etapa del DTI que cumpla una función dentro de la secuencia de generación de nitrógeno.



DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO
UNIDAD GENERADORA DE N₂
DOMESTICO

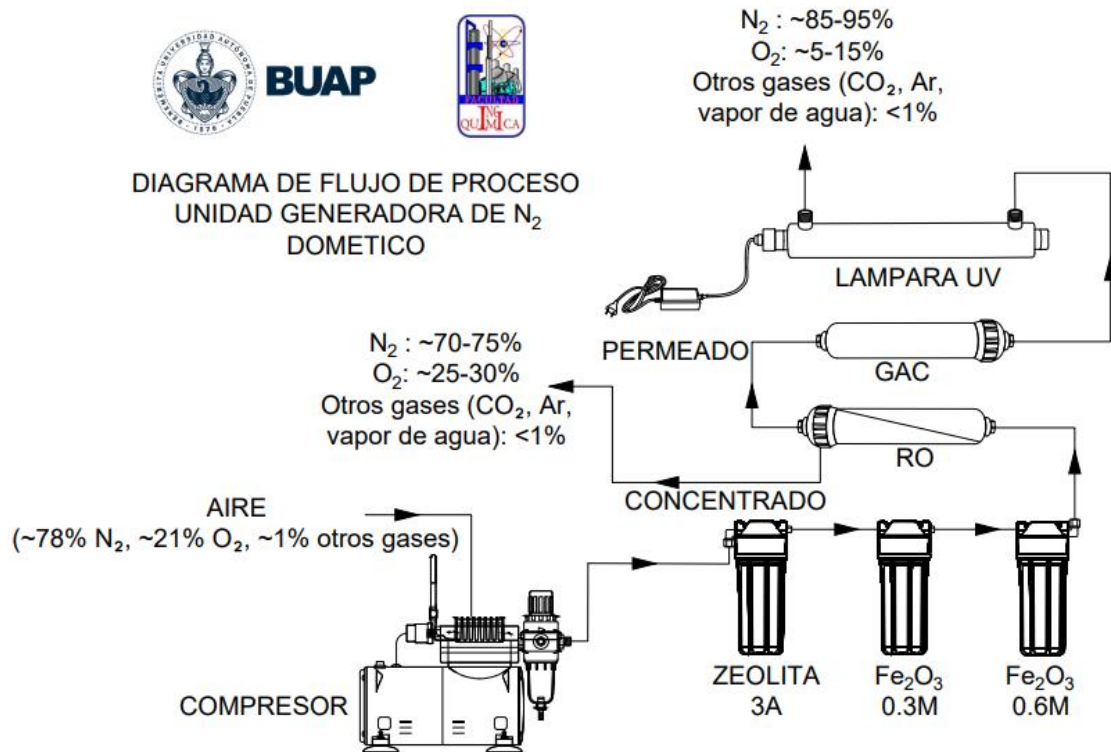


Figura 11. Secuencia de flujo en el equipo.

M-101 Compresor de aire

Proporciona la corriente de alimentación mediante el flujo de aire comprimido. Su operación es esencial debido a que define el caudal disponible y constituye el punto de partida del proceso.

T-201 Filtro de zeolita 3A

Esta etapa es indispensable para evitar que la humedad deteriore los materiales debido a que la zeolita 3A activada es la encargada de adsorber la humedad del aire de entrada con el objetivo de reducir el contenido de vapor de agua y prevenir la disminución de la eficiencia de la membrana de ósmosis inversa.

T-301 Y T-302 Absorbentes dopados con cloruro férrico

La corriente de aire deshumidificado pasa por dos cartuchos de carbón activado dopado con cloruro férrico FeCl₃ de diferentes concentraciones (0.3 M y 0.6 M). Con el objetivo de reducir la fracción de oxígeno y refuerza la captura de oxígeno para obtener una corriente con un flujo más enriquecido en nitrógeno antes de la separación por membrana de ósmosis inversa.

T-401 Membrana de ósmosis inversa

Esta etapa puede ser considerada la más importante debido a que actúa como barrera selectiva entre oxígeno y el aire comprimido para favorecer el paso del nitrógeno, generando un flujo hacia el permeado y el concentrado en la corriente de salida.

T-501 Filtro de carbón granular

La corriente de nitrógeno permeado atraviesa este cartucho para que retire impurezas residuales y compuestos no deseados para asegurar la calidad del gas.

T-601 Lámpara ultravioleta (UV)

Por último, la etapa de nitrógeno es esterilizado para una mayor seguridad bacteriana, ya que inactiva posibles microorganismos presentes en la corriente de corriente, siendo esterilizada la corriente garantizamos el producto para aplicaciones alimentarias.

En conjunto el DTI incluye instrumentos críticos y una representación esquemática del sistema, además refleja la lógica de operación y la interacción entre las etapas, tales como el sensor de oxígeno y un monitor de la lámpara UV, junto con la integración de válvulas de aguja que permiten regular manualmente el flujo y la presión en cada etapa para un mejor control de la operación.

4.1.2 Justificación de la secuencia de etapas

Las etapas se ordenan considerando los contaminantes presentes en la corriente de alimentación de aire comprimido, además de los materiales empleados como medios de separación, siempre siguiendo los principios de ingeniería de procesos y operaciones unitarias con la necesidad de maximizar la eficiencia de nitrógeno.

Compresor de diafragma y válvula reguladora de presión.

Esta etapa constituye una condición limitante o de frontera de entrada debido a que el compresor establece las condiciones operación del caudal y presión, garantizando la energía de impulsión del sistema y fija el rango de presión de la válvula reguladora, evitando así las sobrecargas hidráulicas que pueden llegar a comprometer los cartuchos de carbón activado dopados con cloruro férrico y la membrana de ósmosis inversa.

Cartucho de zeolita 3A

El pretratamiento con adsorción selectiva de vapor de agua es la primera operación unitaria, ya que controla la humedad para estabilizar a los medios adsorbentes posteriores y tener una menor pérdida de presión, debido a que la presencia de humedad compromete la capacidad de adsorción de oxígeno del carbón dopado con cloruro férrico y acelera el deterioro de la membrana de ósmosis inversa.

Cartuchos de carbón activado dopados con cloruro férrico a concentración 0.3 M y 0.6 M

Para establecer el gradiente de afinidad química se utilizó la optimización de la transferencia de masa, es decir, la reducción progresiva de la fracción molar de O₂, evitando así la saturación prematura de un solo cartucho y mejorando la eficiencia de adsorción para prolongar la vida útil del sistema. Se utilizaron dos etapas, la primera con una concentración de 0.3 M que actúa como barrera primaria con la capacidad de captura de oxígeno y el segundo cartucho con una concentración de 0.6 M que opera como etapa de pulido y remueve el oxígeno residual.

Membrana de ósmosis inversa ULP-2012-100G

Esta etapa constituye la operación con mayor selectividad del equipo, ya que se diseñó con la configuración de flujo cruzado para permitir mantener el gradiente de presión parcial necesario, debido a que es una etapa que requiere baja humedad y reducido contenido de oxígeno para maximizar su eficiencia de separación por permeabilidad diferencial y favorecer la concentración de nitrógeno en la corriente de rechazo.

Cartucho de carbón activado granular

El objetivo de esta absorción física es la función de etapa de pulido para garantizar la eliminación de trazas de compuestos volátiles o subproductos de las etapas anteriores, además de obtener calidad de gas producido y estabilizar el flujo de la corriente.

Lámpara ultravioleta

La etapa final para asegurar una inocuidad microbiológica, se realiza una operación de aseguramiento de calidad, donde la corriente de nitrógeno es sometida a radiación UV, debido a que es indispensable para aplicaciones con alimentos y garantizar que no exista la proliferación microbiana.

La secuencia de las etapas prolonga la vida útil de los materiales, minimiza la pérdida de eficiencia y garantiza la seguridad en la conservación además de la calidad de pureza en el nitrógeno.

4.1.3 Variables independientes

Estas variables independientes pueden ser modificadas y controladas en parámetros de operación y configuración para evaluar la pureza y estabilidad de la corriente de nitrógeno.

Caudal de alimentación de aire (Litros/Min)

El control de la variable del caudal de flujo de alimentación es modificado mediante el compresor de diafragma y las válvulas de aguja instaladas. Esta variable afecta directamente

a la caída de presión del equipo, en la captura de oxígeno y el tiempo de vida útil de los cartuchos y membranas instaladas en el sistema.

Presión de operación (Bar)

La encargada de la regularización de esta variante es la válvula de control en la descarga del compresor. La variable es un factor crítico para la permeabilidad diferente del flujo de gases debido a que condiciona los mecanismos de adsorción y en la membrana de ósmosis inversa.

Concentración de dopado en el carbón activado (Moles)

Para definir la densidad en los sitios activos para la adsorción de oxígeno, se doparon con cloruro férrico dos concentraciones 0.3 M y 0.6 M, ya que la comparación entre ambas concentraciones evalúa la capacidad de remoción de O₂.

Masa de absorbente empacado (g/cm³)

La cantidad de zeolita y carbón dopado con cloruro férrico condiciona la capacidad de adsorción, por ende, hay variaciones en la purificación y la eficiencia del secado, además de la frecuencia de regeneración del contenido.

Tiempo de exposición (Días)

Para determinar la degradación de los materiales, consideramos la duración acumulada de ciclo de vida de los cartuchos antes de la regeneración o en su debido caso en reemplazo.

Modo de aplicación del gas (Min)

Esta variable analiza las formas de aplicación, debido a que en este caso se utilizarán dos tipos de aplicación, inyectó directa en bolsas selladas y desplazamiento en recipientes herméticos para poder condicionar la concentración residual de oxígeno y la extensión de vida útil del producto.

Los factores de diseño experimental permiten un análisis sistemático para identificar las condiciones óptimas con variables independientes que maximizan la pureza del nitrógeno y la eficiencia de conservación alimentaria, además de caracterizar el desempeño del sistema bajo distintas condiciones de operación.

4.1.4 Variables dependientes

Para evaluar el desempeño del sistema y establecer la eficiencia del equipo modificado para la generación de nitrógeno, estas variables no se controlan directamente, ya que corresponden a los parámetros de salida del proceso y son resultado de la interacción entre las condiciones de operación y los materiales modificados.

Concentración de oxígeno en la corriente de salida (%O₂)

Al obtener una menor fracción de O₂ en la corriente de salida del sistema, nos genera una mayor pureza del nitrógeno, debido, a que la concentración de oxígeno es un indicador crítico de desempeño del sistema porque refleja la eficiencia de los cartuchos adsorbentes y de la membrana de ósmosis inversa.

Pureza de nitrógeno en la corriente de salida (%N₂)

Esta variable es el objetivo principal del sistema y es complementaria a la anterior, es calculada en función del balance de gases, ya que la pureza del nitrógeno determina la capacidad del gas al desplazar oxígeno en recipientes.

Humedad residual en la corriente de salida (%HR)

Al generar una corriente con bajo contenido de humedad asegura mayor durabilidad del sistema, mejorando la conservación de los alimentos y, además, evalúa la eficiencia del cartucho de zeolita 3A en la eliminación de vapor de agua y su efecto en la estabilidad de los adsorbentes posteriores.

Caída de presión a través del sistema ΔP (Bar)

La eficiencia global es afectada debido al incremento progresivo en la caída de presión, lo cual representa la resistencia hidráulica acumulada en las etapas e indica una saturación de los cartuchos.

Tiempo de conservación de los alimentos (Días)

Esta variable se determina a partir de las pruebas con el pan de caja. Se analiza a través del retardo del crecimiento microbiano y la presentación de características organolépticas, reflejando así el impacto real del gas producido.

Número de ciclos de regeneración efectivos de los adsorbentes (Meses)

Vinculando a la sostenibilidad y costo operativo del sistema. Se mide y analiza la capacidad de reutilización de la zeolita y del carbón activado dopado con cloruro férrico tras cada proceso de regeneración térmica.

El sistema debe ser evaluado con las variables dependientes desde su eficiencia técnica mediante la pureza del gas, la caída de presión y la humedad residual, hasta su impacto práctico con la vida útil de alimentos y capacidad de regeneración de materiales para así cerrar el ciclo de análisis del sistema.

4.2 Descripción del equipo y materiales. Especificaciones técnicas de cada componente.

Compresor de diafragma



Figura 12. Compresor de aire. Marca Truper, modelo COMP-AERO (Código 17247).

Se ingresa a la corriente del compresor de aire que es un compresor de aire específicamente para aerógrafo, por lo tanto, esto lo hace compacto, de fácil manejo y perfecto para esta aplicación en conservación de alimentos debido a su motor eléctrico de 1/6 Hp, que suministra aproximadamente de 20 a 23 litros por minuto, una presión de 30 a 40 PSI hasta un máximo de 60 PSI.

Está equipado con un regulador de presión con manómetro y filtro de humedad, lo cual ayuda a una previa deshumidificación del aire antes de entrar a la primera etapa y garantiza un flujo de aire constante y limpio. También cuenta con un protector de voltaje para evitar daños eléctricos.

Válvula reguladora de presión



Figura 13. Válvulas de aguja de acero inoxidable 304 de 1/2 y 1/4.

Se empleó una válvula de aguja de acero inoxidable 304, la cual regula el flujo y la presión de aire comprimido en las etapas de filtración y separación. En consideraciones técnicas la válvula presenta una conexión nominal de ½” con rosca NPT, además una resistencia de operación de hasta 3000 psi y un rango de temperatura de trabajo de -20°C a 200°C para garantizar la estabilidad en condiciones variables de operación.

Esta válvula permite el control preciso del caudal y el empleo del acero inoxidable protege de la corrosión para asegurar la durabilidad con el contacto del aire comprimido y nitrógeno, es así como se protege la membrana de ósmosis inversa.

Cartucho con zeolita 3A y carbón granular



Figura 14. Porta cartucho tamaño estándar de 10". Marca Evans.

Los cartuchos incluidos en el sistema de ultrafiltración marca Evans, que contienen carbón activado en 3 diferentes presentaciones fueron diseñadas para la remoción de cloro, compuestos orgánicos volátiles, sabores y olores presentes en el agua. Estos cartuchos son fabricados con carbón activado granular y en bloque con tamaño estándar de 10" para facilitar su reemplazo y tener mayor compatibilidad con cualquier filtro comerciales con capacidad de filtración típica de 5 a 10 micras para retener partículas finas, con la finalidad de proteger las membranas de ultrafiltración y ósmosis inversa.

En la actualidad, tienen una vida útil aproximada de 3 a 6 meses con una capacidad promedio de servicio de entre 3000 a 5000 litros, garantizando así un funcionamiento óptimo actúan como barrera de protección. En este sentido se destaca que la norma oficial mexicana NOM-201-SSA1-2015, la cual establece los parámetros de calidad microbiológica, fisicoquímica y desinfección relativa a productos y servicios de agua y hielo para consumo humano que deben cumplirse, en este caso el uso de cartuchos de carbón activado constituye una práctica

alineada en las disposiciones vigentes para garantizar un tratamiento adecuado y seguro en el ámbito doméstico (Secretaría de Salud, 2015).

Membrana ULP-2012-100G



Figura 15. Membrana ULP-2012-100G.

Para esta investigación se utilizó la membrana de ósmosis inversa modelo ULP-2012-100G, debido a su capacidad de producir hasta 100 galones por día bajo condiciones estándar de prueba además de una alta eficiencia en la eliminación de impurezas disueltas.

En especificaciones técnicas opera con una presión de trabajo óptima de 60 psi y soporta un rango de presión máxima de hasta 300 psi, compuesta con un diseño compacto tipo espiral enrollada con dimensiones de 11.75 pulgadas de longitud y 1.8 pulgadas de diámetro para permitir la instalación en carcasas convencionales de 2 pulgadas, las cuales son de tamaño estándar y usadas en este equipo.

Esta membrana es fabricada en material poliamida de película delgada (TFC), debido a su resistencia química y durabilidad en aplicaciones continuas. Estas especificaciones hacen que la membrana de ósmosis inversa sea fundamental en el equipo modificado de generación de nitrógeno, por lo tanto, esto asegura una corriente de gas libre de humedad y contaminación provenientes del sistema y de la corriente de alimentación.

Cartucho Abrillantador



Figura 16. Cartucho abrillantador con carbón activado. Marca Evans.

La etapa complementaria dentro del sistema de generación del nitrógeno es el cartucho abrillantador con carbón activado granular (T-501), el cual es un material con estructura altamente porosa y alta área superficial específica con una notable capacidad de adsorción de compuestos orgánicos volátiles. Al incluir en el equipo garantizamos la calidad final del gas antes de su aplicación en alimentos.

Se le llama “Abrillantador” debido a que es una barrera de pulido final que asegura un gas de mayor pureza y calidad sensorial. Con la función de contribuir a mantener el nitrógeno en condiciones aptas y actuando como el filtro de seguridad de impurezas.

El cartucho es un modelo doméstico de fácil reemplazo, su vida útil depende de la saturación del material adsorbente y la concentración de contaminantes presentes en el flujo. En otras palabras, el cartucho de carbón activado aporta un nivel de purificación y confiabilidad del sistema, complementando las etapas de adsorción química para adecuar para el uso en alimentos domésticos.

Lámpara ultravioleta



Figura 17. Lámpara ultravioleta. Marca Evans.

La lámpara ultravioleta tiene como función principal la esterilización del flujo gaseoso para así obtener la seguridad de un gas inocuo y libre de posibles contaminantes microbiológicos en su aplicación en la conservación de alimentos. Cuenta con una longitud de onda cercana a los 254 nm, debido a que es un modelo doméstico de baja potencia con un rango operativo de alrededor de 8 a 11 W por el caudal reducido de gas generado por el sistema.

El tubo principal de emisión está fabricado principalmente por cuarzo de alta pureza por su habilidad de permitir el paso de radiación UV-C sin pérdidas significativas y de manera que el nitrógeno atraviesa directamente antes de la corriente de salida.

Para garantizar la confiabilidad de operación, el tiempo de contacto de la radiación con el gas es instantáneo y se implementa un indicador luminoso para indicar visualmente el estado de la lámpara, ya que su vida útil oscila entre 7000 y 9000 horas de uso.

Esta etapa genera una barrera microbiológica complementaria y así asegurando que se cumpla con el estándar mínimo de seguridad microbiológica para su aplicación en la conservación de alimentos.

Tuberías de polietileno

Las tuberías del sistema ocupan polietileno de ¼ de pulgada de diámetro exterior por su control de caudal y presión. Además de facilitar la conexión modular con cartuchos, válvulas y membranas, estandarizando el sistema doméstico de ósmosis inversa debido a que presenta alta resistencia a la humedad, baja permeabilidad a gases y buena estabilidad química.

Ensamblaje del sistema

Durante el ensamblaje del equipo de generación de nitrógeno a partir de la modificación de un equipo comercial de ultrafiltración hacia un equipo de ósmosis inversa. Iniciando con la instalación del compresor del aire Truper para aerógrafo, el cual suministra la corriente de alimentación.

Con el fin de asegurar el control preciso del flujo de presión en el trayecto, por lo tanto, se instalaron válvulas de aguja antes y después de cada cartucho de filtración y de cada etapa posterior, así como en las conexiones de entrada y salida de la membrana para así permitir una regulación y control manual del paso del aire además se evita sobrepresiones y pérdidas de eficiencia en el proceso de separación.

Para la primera etapa de purificación, la corriente de alimentación ingresa al primer cartucho relleno de zeolita 3A, a continuación la corriente pasa por el segundo cartucho relleno con carbón dopado con cloruro férrico a concentración de 0.3 M y el tercer cartucho relleno con carbón dopado con cloruro férrico a concentración de 0.6 M, el objetivo de los 2 últimos cartuchos fueron incorporados con el objetivo de potenciar la adsorción de oxígeno y mejorar la selectividad hacia el nitrógeno.

Al finalizar la etapa anterior, la corriente pasa al módulo de separación final, donde se utilizó una carcasa tamaño estándar para sustituir la membrana de ultrafiltración que contiene poros más grandes que la membrana de ósmosis inversa ULP-2012-100G para facilitar la adaptación y la eliminación de humedad residual y partículas disueltas permitiendo obtener un flujo enriquecido en nitrógeno.



Figura 18. Membrana de ultrafiltración. Marca Evans.



Figura 19. Carcasa tamaño estándar.

Por último, la corriente enriquecida con nitrógeno pasa por una lámpara UV para una corriente más pura, después la corriente fue dirigida hacia un oxímetro con sensor de aire, el cual permitió medir la concentración de oxígeno y de manera indirecta estimar la pureza del nitrógeno obtenido.

Puesta en marcha

La puesta en marcha del equipo modificado de generación de nitrógeno se prepara con una revisión general de las conexiones y de la hermeticidad de cada componente, es importante asegurarse de que las válvulas de aguja estén en posición cerrada antes de alimentar el sistema.

Encendido del compresor: Al encender el compresor de aire Truper hasta ajustar la presión de 3 bar en la línea de alimentación, la cual es una condición estándar mínima para compensar las pérdidas de carga posteriores.

Apertura progresiva de válvulas: Después de alcanzar los 3 bar de presión, se abrió la primera válvula que se ubica antes del primer cartucho de zeolita 3A hasta que la presión fuera estable en 3 bar, después se abre la segunda válvula que tiene una caída de presión de aproximadamente $\frac{1}{2}$ bar y así continuamente hasta llegar a la membrana de ósmosis inversa. Siempre conservando los 3 bares de presión.

Paso hacia la membrana de ósmosis inversa: Después, el aire se conduce hasta la membrana de ósmosis inversa ULP-2012-100G. Dado que esta etapa implica una caída adicional de presión, se asegura un control cuidadoso para mantener un régimen de operación estable.

Regulación de permeado: Se debe realizar un ajuste al permeado mediante las válvulas de aguja para lograr que la corriente de salida permita marcar concentraciones de oxígeno cercanas al 15%. Para una mejor comprobación de que el sistema genera un flujo enriquecido en nitrógeno.

Verificación de fugas: Durante todo momento de la operación se verificó la ausencia de fugas y la estabilidad de la presión en cada punto para corregir las desviaciones y fugas.

Una vez establecidas las condiciones de presión y flujo garantizando ausencia de fugas, además de lecturas estables en el oxímetro. Se considera que el equipo está en condiciones óptimas para su uso.

Adición del tanque de amortiguamiento: Debido al oxímetro que utiliza un sensor de flujo se colocó una piseta ligeramente modificada para contener una mínima cantidad de corriente para medir el oxígeno e indirectamente el nitrógeno.

Pruebas en recipiente: Por último, la corriente de nitrógeno obtenido es dirigida al recipiente hermético de grado alimenticio previamente adaptado y listo para iniciar las pruebas de conservación bajo atmósfera modificada.

4.3 Operación manual del sistema

Manual de Operación Técnico

1. Equipos involucrados

- Compresor de diafragma (M-101)
- Cartucho con zeolita 3A (T-201)
- Absorbedores dopados con FeCl_3 (T-301 y T-302)
- Membrana de ósmosis inversa ULP-2012-100G (T-401)
- Filtro de carbón granular (T-501)
- Lámpara ultravioleta (T-601)
- Válvulas de aguja (HV-101 a HV-106)

2. Condiciones iniciales

- Verificar que todos los cartuchos (zeolita, absorbedores y carbón granular) estén instalados correctamente.
- Confirmar que la membrana ULP-2012-100G se encuentre en su carcasa y libre de humedad excesiva.
- Revisar que las conexiones de mangueras estén firmes y sin fugas.
- Cerciorarse de que la lámpara UV esté instalada y operativa (indicador luminoso en estado apagado antes de encendido).
- Todas las válvulas de aguja deben encontrarse cerradas al inicio.

3. Procedimiento de operación

Paso 1: Encendido inicial

1. Conectar el sistema a la fuente de energía eléctrica.
2. Encender la lámpara UV (T-601) y verificar el indicador luminoso (LIT-108).

Paso 2: Alimentación de aire comprimido

1. Abrir la válvula de entrada HV-101 para permitir el paso de aire al compresor (M-101).
2. Encender el compresor de diafragma.
3. Ajustar la válvula reguladora de presión hasta alcanzar una presión de trabajo de aproximadamente 3 bar.

Paso 3: Acondicionamiento del aire

1. Abrir la válvula HV-102 para dirigir el flujo al cartucho de zeolita 3A (T-201).

Paso 4: Reducción de oxígeno en etapas adsorbentes

1. Abrir progresivamente la válvula HV-102 (entrada a T-301).
2. Dejar que el aire pase por el primer absorbedor dopado con FeCl_3 (0.3 M).
3. Abrir HV-103 para dar paso al segundo absorbedor (0.6 M).
4. Confirmar la reducción de oxígeno con el sensor OIT-107.

Paso 5: Separación por membrana de ósmosis inversa

1. Abrir HV-104 para dirigir la corriente al módulo de membrana ULP-2012-100G (T-401).
2. Ajustar HV-105 y HV-106 para equilibrar la salida del permeado (N_2 enriquecido) y del rechazo (corriente con mayor O_2).
3. Monitorear la presión diferencial mediante DPIT-104 para evitar sobrecargas en la membrana.

Paso 6: Purificación y esterilización

1. Dirigir el permeado al cartucho de carbón granular (T-501).
2. Medir el oxígeno residual con el sensor OIT-107 para estimar la pureza del nitrógeno.
3. Finalmente, el gas pasa a través de la lámpara UV (T-601) para su esterilización.

4. Cierre del sistema

1. Apagar el compresor de diafragma.
2. Cerrar todas las válvulas de aguja (HV-101 a HV-106).
3. Apagar la lámpara UV.
4. Desconectar la alimentación eléctrica si no se realizarán más pruebas.

5. Seguridad y observaciones

- No operar el compresor por más de 5 minutos continuos para evitar sobrecalentamiento, esta recomendación se realiza a pesar de que el compresor cuenta con su protección y apagado automático por alta temperatura.
- Asegurar un área ventilada para el rechazo de oxígeno.
- Evitar exposición directa a la radiación UV durante la operación.
- Registrar cada ensayo en la bitácora de operación, anotando presión inicial, presión final, concentración de oxígeno y duración del ciclo.

4.4 Análisis de costos

A continuación, se presenta un análisis de costos del equipo modificado, el cual se estructuró en categorías funcionales para facilitar su identificación, además de elaborar una tabla detallada con el costo unitario, la cantidad y el subtotal de cada componente. Recordando que no se agregó mano de obra operaria y costo de operación.

Esta perspectiva permite comparar el sistema modificado frente a opciones comerciales en términos de costo inicial, costo anual y posible periodo de recuperación relacionados con el periodo de recuperación.

Componente	Cantidad	Costo unitario (MXN)	Subtotal (MXN)	Observaciones
Equipo comercial para prurificación de agua. Marca Evans	1	\$2,325.86	\$2,325.86	Paquete original que incluye: 3 Cartuchos, 1 Lámpara UV, 1 Cartucho abrillantador y Mngueras tipo Tubing. (Sin costo de membrana de Ultrafiltración)
Membrana de Ultrafiltración UF	1	\$317.90	\$317.90	Total por pieza
Membrana de Ósmosis Inversa RO	1	\$230.76	\$230.76	Total por pieza
Cartucho para membrana RO	1	\$129.64	\$129.64	Complemento para membrana RO
Válvulas de aguja NPT (6) - precio total	5	\$78.64	\$393.20	Precio total por 6 piezas; unitario calculado
Válvulas de aguja para permeado SCF (2) - precio total	1	\$80.00	\$80.00	Precio total por 2 piezas; unitario calculado
Conexiones (codos y arreglos)	1	\$342.00	\$342.00	Total por conexiones
Compresor. Marca Truper	1	\$1,695.00	\$1,695.00	Motor / suministro de flujo
Herramientas y consumibles	1	\$190.00	\$190.00	Adhesivos, selladores, etc.
Total	Equipo Completo			\$5,704.36

Tabla 2. Precios detallados de cada componente del equipo modificado.

En la tabla 2 se muestra el precio unitario del costo de cada uno de los componentes del equipo modificado, para el caso de la sustitución de la membrana de ultrafiltración por la membrana de ósmosis inversa se realizan los siguientes cálculos.

Costo del equipo con membrana de ósmosis inversa:

$$\$2325.86(\text{Costo del equipo}) - \$317.9(\text{UF}) + \$230.76(\text{RO}) = \$2238.72$$

Sumando el costo de todos los componentes nos da un costo de: \$5,704.36

El costo anterior incluye solo la parte de los componentes físicos, sin contemplar la mano de obra (Instalación), costo de operación y el oxímetro para medir indirectamente el nitrógeno.

Para el costo del recipiente hermético de grado alimenticio solo se considera el costo del recipiente más el costo de las válvulas.

Costo de recipiente: \$128.00

Costo por válvula: \$35.80

Costo total del recipiente modificado: \$199.6

El costo total del equipo modificado anteriormente calculado es significativamente menor al de sistemas industriales de generación de nitrógeno como el generador comercial de la serie Parker Balston N2-14 que se ofrece en aproximadamente USD 21,133.00 (389,269.86 Pesos mexicanos) en el catálogo de Fisher Scientific (Fisher Scientific, 2025). Confirmando así la viabilidad económica del prototipo, al ser una alternativa accesible y replicable en el entorno doméstico sin requerir inversiones elevadas, por lo tanto, lo hace un diseño factible, sustentable y accesible con impacto directo en la reducción del desperdicio alimentario y de prácticas sostenibles de conservación.

4.5 Análisis de datos. Métodos de registro de datos en bitácora

4.5.1 Ensayos con alimentos

Las pruebas se realizaron utilizando pan blanco comercial, en tres condiciones distintas:

Muestra control (Muestra 1)

Empaque original sin ningún tipo de modificación. Esta prueba presentó un deterioro acelerado. A los pocos días de almacenamiento se observó la formación de colonias fúngicas visibles, especialmente en la superficie del pan en contacto con las paredes internas de la bolsa. Al finalizar los 30 días de prueba, el producto se encontraba ampliamente cubierto por moho verde y blanco, lo que indica una pérdida total de aptitud para consumo. Este resultado confirma la alta susceptibilidad del pan blanco al deterioro microbiano cuando se conserva en condiciones ambientales normales, y valida su elección como alimento modelo para el presente estudio.



Figura 20. Resultados de las condiciones de la muestra 1 de control.



Figura 21. Resultados de las condiciones de la muestra 1 de control.

Muestra en bolsa original inyectada con N₂ (Muestra 2)

Los resultados de esta prueba se observan ligeramente menos deteriorados que en la muestra de control, debido a que se encontró menor crecimiento de moho por una menor cantidad de nitrógeno. Durante los primeros días se mantuvo en buen estado, pero al final del periodo experimental (30 días) se observaron colonias fúngicas en la superficie interna y en rebanadas próximas a las paredes del empaque. El crecimiento microbiano fue menos extendido que en la muestra control, aunque igualmente significativo, lo que evidencia que el tratamiento con nitrógeno en este tipo de bolsa plástica retrasó parcialmente el deterioro, pero no logró inhibirlo de manera completa. Esta limitación se asocia principalmente a la permeabilidad del material de la bolsa, que permitió la entrada gradual de oxígeno residual.



Figura 22. Resultados de las condiciones de la muestra 2 en bolsa original inyectada con N₂.



Figura 23. Resultados de las condiciones de la muestra 2 en bolsa original inyectada con N₂.

Muestra en recipiente hermético adaptado (Muestra 3)

El pan blanco comercial fue colocado en un recipiente hermético adaptado con entrada de gas. En este caso, la tercera muestra, se observó la mayor eficacia en la conservación del pan.

Durante los primeros 20 días no se detectaron cambios visuales notables en la superficie del producto, manteniéndose con apariencia fresca y sin colonias visibles. Hacia el final de la prueba, el desarrollo de moho fue mínimo en comparación con las otras dos muestras, limitándose a pequeñas zonas superficiales. Estos resultados demuestran que la hermeticidad del envase desempeña un papel crítico en la preservación del efecto del nitrógeno, ya que una menor permeabilidad al oxígeno permitió conservar la atmósfera modificada por más tiempo, retrasando significativamente la proliferación microbiana.



Figura 24. Resultados de las condiciones de la muestra 3 en recipiente hermético.



Figura 25. Resultados de las condiciones de la muestra 3 en recipiente hermético.

4.5.2 Gráficos esperados: O₂% VS Tiempo y %N₂ VS Tiempo.

En este punto analizaremos las gráficas de manera comparativa con el desempeño del sistema y su efectividad en la conservación de alimentos. Se puede apreciar en la tabla 2 los valores obtenidos en las pruebas realizadas del sistema, donde el %O₂ varía entre un 15% y 19.8%, por lo tanto, los resultados del %N₂ varía entre 80.2% y 85%.

Los resultados de estas representaciones gráficas de concentración de oxígeno y nitrógeno en función del tiempo de operación apoyan la evidencia de la capacidad del equipo sobre el desplazamiento de oxígeno y generación de nitrógeno con un máximo de pureza de hasta un 85%. En lo sucesivo, el análisis de la evaluación de la vida útil del pan de caja comercial en diferentes condiciones de almacenamiento revela el impacto de esta modificación.

A consecuencia, la muestra de control expone un deterioro acelerado con bastante aparición de moho, en cambio la muestra en la bolsa original con N₂ presenta un retraso parcial en la aparición de moho ligeramente menor que en la muestra de control, al contrario de la muestra en el recipiente hermético con N₂ proporciona la mayor eficacia en las pruebas.

Se deduce mediante los gráficos presentados que la estrategia de aplicación de atmósferas controladas de nitrógeno ayuda a extender la vida útil de los alimentos, sin embargo, la capacidad y eficacia depende de la forma de almacenamiento y la condición de operación del sistema.

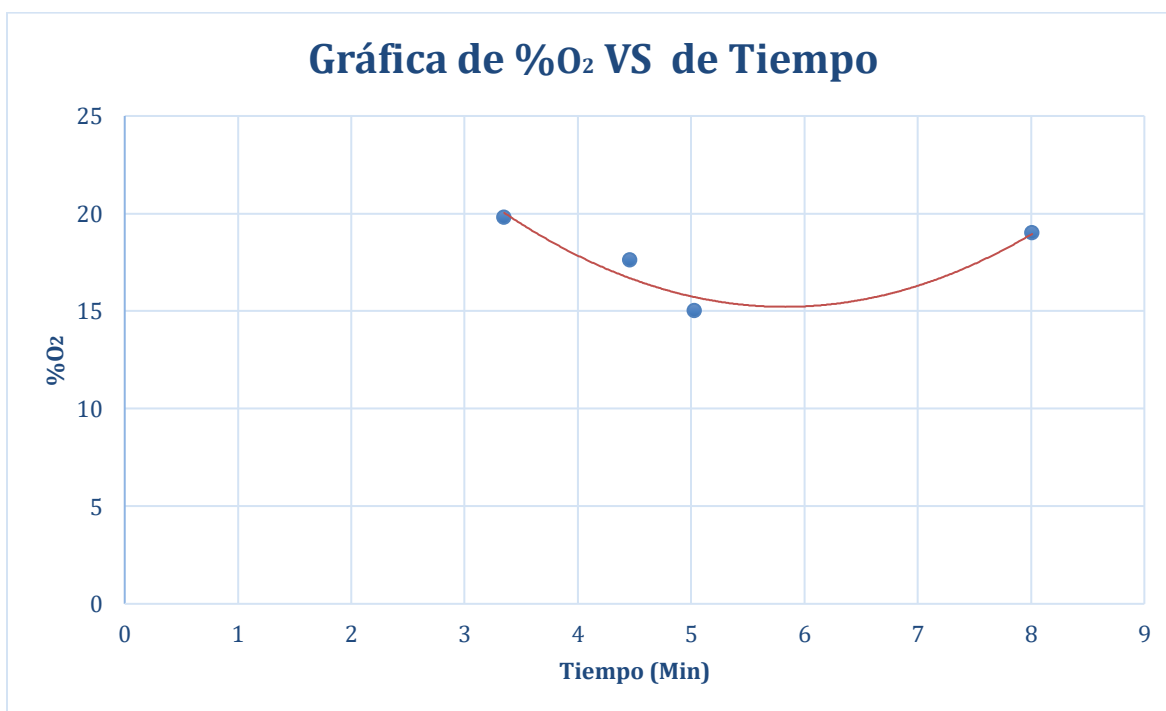
Prueba	Tiempo (Min)	%O ₂	%N ₂
1	3.35	19.8	80.2
2	5.03	15	85
3	8.01	19	81
4	4.46	17.6	82.4

Tabla 3. Resultados de las pruebas de concentración de oxígeno y nitrógeno en función del tiempo de operación.

Gráfico 1. Variación del %O₂ en función del tiempo de operación.

En el gráfico 1 se presentan los resultados de la evolución de la concentración de oxígeno en función al tiempo de operación del sistema que muestran una disminución inicial de O₂, debido a que se obtuvieron valores cercanos al 20% hasta un pico menor aproximado del 15% con un tiempo de operación de 5 a 8 minutos.

Esto indica un sistema que es capaz de desplazar oxígeno de manera constante en los primeros minutos y alcanzar un punto de equilibrio que solo es condicionado por el compresor y la capacidad de los materiales adsorbentes. Al obtener una ligera recuperación de O₂ se atribuye a la caída de presión continua del sistema y así reduce la eficiencia del desplazamiento gaseoso.

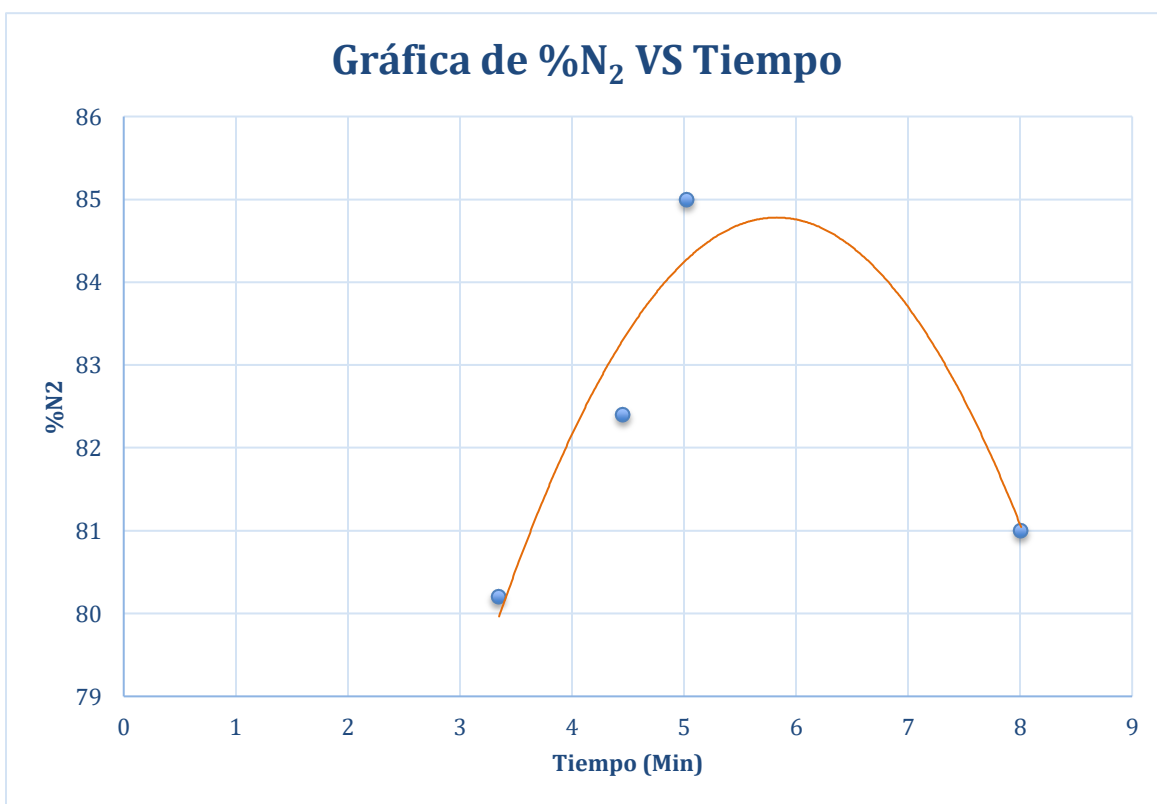


Gráfica 1. Variación del %O₂ en función de operación del sistema modificado.

Gráfico 2. Variación del %N₂ en función del tiempo de operación.

En el gráfico 2 se presentan los resultados de la evolución de la concentración de oxígeno en función al tiempo de operación del sistema que muestran un incremento progresivo del %N₂ desde aproximadamente 80% hasta un máximo del 85% con una función de 5 minutos en tiempo de operación.

Este desempeño evidencia la efectividad del equipo modificado para generar nitrógeno, sin embargo, esta capacidad es limitada por las condiciones de presión y flujo del compresor. Al presentar un fenómeno de pérdida de presión, se refleja un pico descendente y resalta la importancia de establecer un tiempo óptimo de operación y maximizar la pureza del nitrógeno, sin comprometer la estabilidad del sistema.



Gráfica 2. Variación del %N₂ en función del tiempo de operación del sistema modificado.

Conclusiones

Observaciones adicionales del sistema

Durante la operación del equipo se identificaron diversos aspectos relevantes que complementan los hallazgos experimentales:

- El tiempo óptimo de operación se ubicó en torno a los 5 minutos por ciclo, ya que en este intervalo se alcanzaron las concentraciones mínimas de O₂ (15 %) y máximas de N₂ (85 %). Operaciones más prolongadas generaron una ligera pérdida de eficiencia debido a la caída de presión.
- La vida útil de los cartuchos adsorbentes de carbón activado dopado y zeolita 3A mostró ser un factor determinante en la estabilidad de la pureza de nitrógeno. Tras varios ciclos, se percibió una tendencia a la saturación, lo que implica la necesidad de protocolos de regeneración o sustitución periódica.
- La hermeticidad de los empaques resultó ser el principal condicionante en la eficacia de la conservación. Aun cuando el sistema logró enriquecer la atmósfera en nitrógeno, las bolsas plásticas originales permitieron el ingreso progresivo de oxígeno, limitando la efectividad del tratamiento.

Recomendaciones para uso y vida útil

Con base en las observaciones realizadas, se sugieren las siguientes recomendaciones para el perfeccionamiento del equipo y su aplicación práctica:

1. **Optimizar** el empaque de alimentos, priorizando recipientes herméticos con baja permeabilidad al oxígeno, ya que esta condición mostró ser determinante en la prolongación de la vida útil del pan.
2. **Establecer** un protocolo de mantenimiento de cartuchos, incluyendo regeneración térmica de la zeolita y reemplazo periódico del carbón activado, con el fin de mantener la eficiencia de adsorción y la estabilidad de pureza en N₂.
3. **Ampliar** la capacidad del compresor o integrar depósitos de aire presurizado que permitan extender el tiempo de operación y mantener un flujo constante sin comprometer la presión interna.
4. **Incorporar** instrumentación básica de control, como manómetros digitales, sensores de humedad y oxígeno en línea, lo cual permitiría monitorear de manera más precisa las condiciones del sistema y optimizar la operación.

5. **Realizar** ensayos con otros alimentos perecederos, como frutas, verduras y carnes, para evaluar la versatilidad del sistema en diferentes matrices alimenticias y condiciones de almacenamiento.
6. **Escalar** el número de réplicas experimentales, con el fin de contar con bases estadísticas sólidas que respalden las diferencias observadas entre tratamientos y fortalezcan la validez de los resultados.
7. **Promover** la implementación doméstica de este tipo de equipos como alternativa ecológica frente al uso de conservadores químicos, contribuyendo a la reducción del desperdicio alimentario y a la sostenibilidad ambiental.

Conclusión

La presente tesis expuso la efectividad técnica y la capacidad de modificar un equipo comercial de ultrafiltración para generación de nitrógeno para uso doméstico y con aplicación en conservación de alimentos. Para optimizar el proceso de separación gaseosa y la obtención de una corriente de nitrógeno, se realizó la modificación e integración de los cartuchos con empaque de carbón activado dopado con cloruro férrico y zeolita 3A, además de la sustitución de la membrana de ultrafiltración por una membrana de ósmosis inversa ULP-2012-100G. Para facilitar la comprensión total del sistema se necesita la incorporación de un diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) y así se define con claridad cada etapa y secuencia lógica de operación.

El sistema presentó durante la puesta en marcha una operación significativa, debido a que en los primeros cinco minutos de operación se logró una concentración de oxígeno de 19.8% hasta 15%, es decir, que se alcanzó una concentración de nitrógeno máxima del 85%. Los resultados obtenidos contribuyen a la evidencia de las gráficas registradas y confirman que el equipo es capaz de desplazar oxígeno y generar nitrógeno, sin embargo, es limitado por condiciones del compresor de diafragma, la caída de presión continua en cada cartucho y la vida útil de los absorbentes empleados en cada cartucho.

Debido a la alta susceptibilidad al deterioro microbiano y pérdida de propiedades organolépticas, se seleccionó el pan blanco comercial como modelo para los ensayos de conservación de alimentos. En cuanto los resultados presentaron evidencias claras entre las diferentes condiciones de almacenamiento, la muestra de control muestra un deterioro acelerado con aparición de moho. La muestra en bolsa original inyectada de N₂ presentó un retraso moderado con presencia fúngica notable, debido a la permeabilidad del empaque, por último, la muestra en recipiente hermético con N₂ representó los mejores resultados, con retraso significativo en la aparición de moho y deterioro mínimo al día 30, esto confirma que el almacenamiento hermético es un factor clave para la atmósfera modificada y prolongar la vida útil del producto.

De manera general, el sistema desarrollado cumple con el propósito de mostrar que es posible implementar una tecnología de atmósferas modificadas (MAP) a escala doméstica utilizando nitrógeno como agente de conservación. La simplicidad del diseño, basado en cartuchos de fácil reemplazo, membranas de ósmosis inversa comerciales y componentes accesibles como válvulas de aguja, lo convierte en un equipo potencialmente replicable y de bajo costo. No obstante, el estudio también reveló limitaciones prácticas, entre ellas: la restricción del tiempo de operación por capacidad del compresor, la necesidad de reemplazo periódico de los adsorbentes, la ausencia de un control automatizado de presión y caudal, y la influencia determinante del tipo de empaque en la efectividad de la conservación.

Los resultados obtenidos respaldan que el uso de nitrógeno como atmósfera protectora es una alternativa ecológica y eficiente para reducir la velocidad de deterioro de alimentos, evitando el uso de conservadores químicos y contribuyendo al combate del desperdicio alimentario. A nivel experimental, se logró comprobar que incluso con un equipo de escala reducida es posible obtener atmósferas enriquecidas en N₂ que extienden la vida útil de productos perecederos.

Finalmente, este trabajo constituye una primera aproximación hacia el diseño de sistemas domésticos de conservación mediante atmósferas modificadas, con potencial de ser mejorado mediante la integración de sensores de control en línea, compresores de mayor capacidad y empaques con propiedades de baja permeabilidad. La implementación de esta tecnología a nivel hogar no solo contribuiría a la seguridad alimentaria y la reducción del desperdicio, sino que también promovería prácticas más sostenibles y accesibles en la conservación de alimentos.

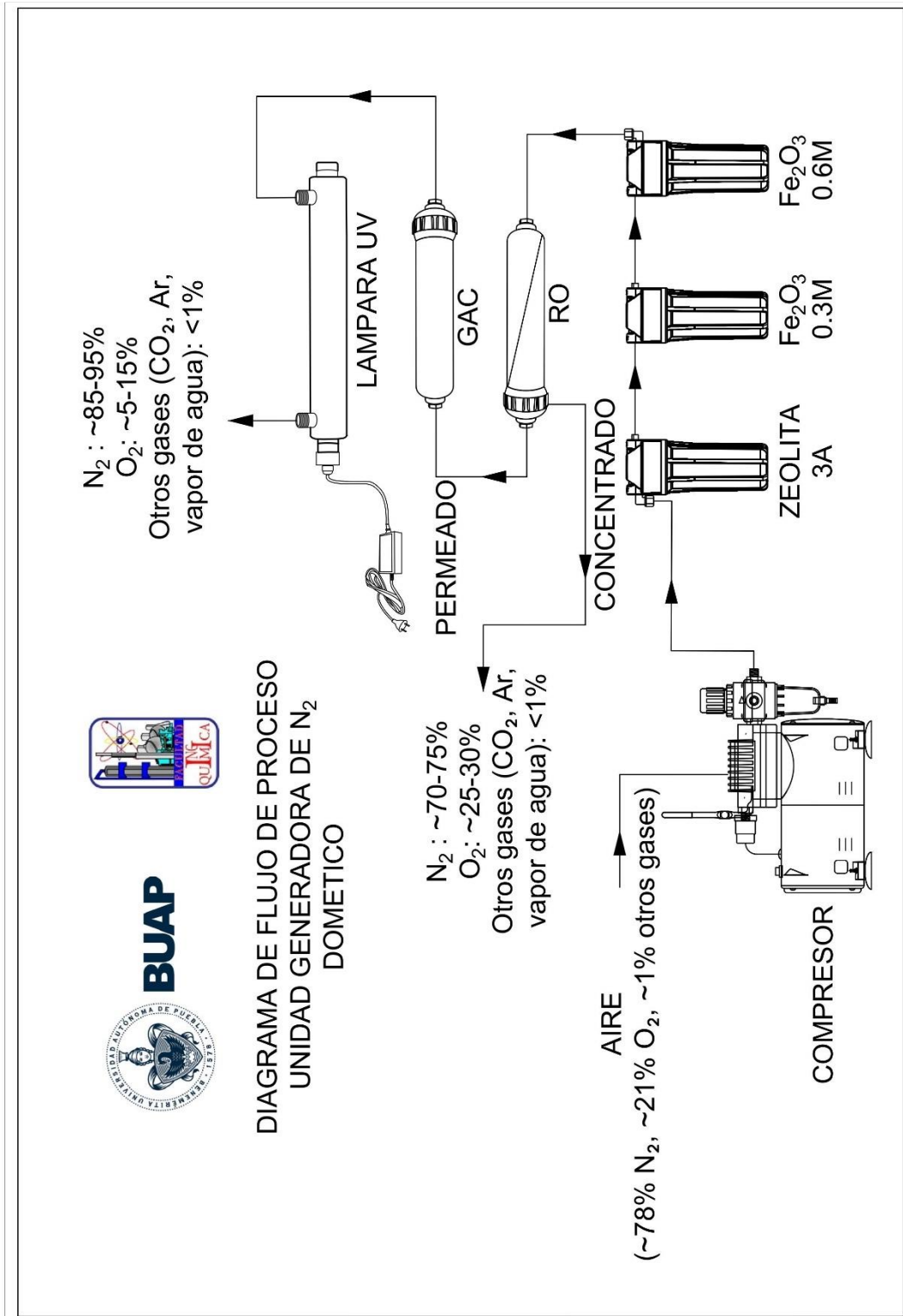
Bibliografía

- Amparán Ochoa, A. C. (2007). Modificación con hierro de carbón activado para remover As en agua [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico e Chihuahua].
- Browne, P., Smith, J., & Lee, R. (2021). Membrane Technology for Nitrogen Separation. Advanced Separation Technologies.
- Carburos Metálicos. (2022). “Aplicaciones del nitrógeno en la conservación de alimentos”. Disponible en: <https://www.carburos.com>
- Fellows. P. (2021). Food Processing Technology: Principles and Practice. Woodhead Publishing.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). “The State of Food Security and Nutrition in the World 2022.” Publicado en 2022. Consultado en septiembre de 2024. <https://www.fao.org>
- González Navarrete, B. D. (2017). Desarrollo de carbón activado a partir de desechos agroindustriales con aplicación en adsorción de arsénico [Memoria de título, Universidad de Chile].
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6.a ed.). McGraw-Hill.
- Jones, A., & Williams, M. (2021). Economic Impacts of Nitrogen in Food Preservation Technologies. Journal of Economic Food Studies.
- Khan, S.- Ali, M., & Raza, M. (2020). Applications of Nitrogen in Food Preservation. Food Chemistry Reviews.
- Merca2.0. (2021). Gráfica del día: La magnitud del desperdicio de alimentos. Recuperado el 13 de enero del 2025, de <https://www.merca20.com/grafica-del-dia-la-magnitud-del-desperdicio-de-alimentos/>
- NOM-003-SCFI-2014. (1994). Productos eléctricos-Especificaciones de seguridad. México.
- NOM-251-SSA1-2009. (2009). Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. México.
- Perry, W., & Taylor, M. C. (2020). Gas and Compressed Air Handbook. Industrial Press.
- Parker Balston Nitrogen Generators: N2-14 Series from Restek nitrogen gas generator. (s/f). Fishersci.com. Recuperado el 15 de septiembre de 2025, de <https://www.fishersci.com/shop/products/parker-balston-nitrogen-generators-n2-14-series-restek/06710898>.

- Román, G. E. (2021). Estudio computacional de la estructura y reactividad de materiales porosos y su interacción con moléculas de interés farmacéutico [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur].
- Sampieri, R. H., Collado, C.F, & Lucio, M. P. B. (2014). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (5.a ed.). McGraw-Hill.
- Secretaría de Salud. (2015). *NOM-201-SSA1-2015. Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias*. Diario Oficial de la Federación.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5424577&fecha=22/12/2015
- Smith, L., Brown, T., & Green, R. (2022). Environmental Benefits of Nitrogen-Based Food Preservation. *Environmental Science & Technology*.
- UN Environmental Programme (UNEP). “Food Waste Index Report 2021.” Publicado en 2021. Consultado en septiembre de 2014. <https://www.unep.org/resources/report>
- Vontron. (2020). *ULP-2012-100G Residential RO Membrane – Product Data Sheet*. Vontron Membrane Technology Co., Ltd. Recuperado de <https://www.vontron.com>
- World Economic Forum. “Global food waste twice the size of previous estimates.” Publicado en marzo de 2023. Consultado en septiembre de 2024.
<https://www.weforum.org> (World Economic Forum)

Anexos

Anexo 1. Diagrama de flujo de proceso del sistema.



Anexo 2. Diagrama de tuberías e instrumentación.

