Modelo para la toma de decisiones en un sistema de economía circular basado en simulación de procesos y árboles de decisión

M.L. Chew Hernández[1], V. Velázquez Romero[2] y L. Viveros Rosas[2]

[1] TECNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco, Jefatura de Ingeniería Química, Av. 16 de septiembre No. 54, Coacalco de Berriozábal, Estado de México, México, mario@tesco.edu.mx
[2] TECNM: Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco, Jefatura de Ingeniería Industrial, Av. 16 de septiembre No. 54, Coacalco de Berriozábal, Estado de México, México, veronica.sub.a@tesco.edu.mx, leopoldo@tesco.edu.mx

Resumen

El comportamiento de los clientes escapa al control de las empresas, por lo que hace difícil la administración de los negocios. La operación bajo un esquema de economía circular, donde al final de la vida útil del producto su comprador puede retornarlo a la empresa en vez de desecharlo, añade incertidumbre a la toma de decisiones empresarial. Este tipo de operación, sin embargo, evita desechar el producto cuando ya no sirve, lo que representa un beneficio ecológico. Un modelo matemático de apoyo al manejo de estos sistemas debe tomar en cuenta la incertidumbre y balancear los aspectos económico y ambiental del problema. En este manuscrito se muestra el desarrollo de un modelo de decisión para un prototipo de cadena de suministro circular, donde se utiliza simulación de procesos y árboles de decisión para manejar la incertidumbre del problema, y una función de utilidad para incluir aspectos económicos y ambientales. El problema abordado consiste en seleccionar una de tres alternativas de distribución del espacio total de inventario entre el almacén de producto terminado y de productos usados. Los resultados se presentan como gráficas que indican la alternativa recomendada de acuerdo con lo que se piense respecto al nivel de propensión de los clientes a traer sus productos usados a la empresa y dada la importancia relativa que el tomador de decisiones dé a los aspectos económicos y ambientales relevantes. En específico, se encuentra que una ponderación mayor a 90% al aspecto ambiental siempre resulta en la recomendación de asignar más espacio al almacén de productos reciclados, salvo cuando no existe posibilidad de tener una alta afluencia de productos reciclados. El procedimiento de análisis permite integrar, de forma transparente, la información y las preferencias del tomador de decisiones en una acción recomendada.

***Palabras clave*— Cadena de suministro circular, Análisis de Decisiones, Simulación de procesos**

A decision analytic model for a closed supply chain system based on process simulation and decision trees

Abstract

The relative unpredictability of customer behaviour makes management difficult. The uncertainty surrounding decision-making increases if a business belongs to a circular economy system, in which, once the product useful life has run out, the customer can opt to bring the worn-out product back to the factory instead of discarding it. This type of operation is environmentally friendly as it diminishes waste generation. A mathematical model to support the management of these systems must consider all relevant uncertainties and balance the proper economic and environmental criteria. This manuscript shows the development of such a model for a prototype circular supply chain, where process simulation and decision trees are used to handle uncertainty while an additive utility function balances the economic and environmental problem dimensions. Specifically, the decision addressed is the choosing of one among three alternative distributions of the total factory inventory space, that is to be split between the finished and the used product warehouses. The results are shown as graphs presenting the recommended alternative contingent on the probabilities for different levels of customer eagerness in bringing used products back to the company, and the company's preferences regarding economic and environmental objectives. Specifically, it is found that assigning a weight greater than 90% to the environmental aspect, results in recommending a bigger space allocation to the recycled product warehouse, exception made when there is no possibility of a high influx of recycled products. It is concluded that the procedure allows the information and preferences of the decision maker to be condensed into a decision in a transparent way.

***Keywords*— Closed supply chain, Decision Analysis, Process Simulation**

I. INTRODUCCIÓN

La industria automotriz se enfrenta a un desafío crítico en el contexto actual de sostenibilidad y cambio climático. A medida que la conciencia sobre el impacto ambiental de los vehículos aumenta, se hace evidente la necesidad de adoptar modelos de producción y consumo más sostenibles. En este sentido, la economía circular emerge como un enfoque innovador que busca transformar la manera en que se diseñan, producen y gestionan los productos a lo largo de su ciclo de vida. Este modelo no solo promueve la reducción de residuos, sino que también fomenta la reutilización y el reciclaje de materiales, contribuyendo así a una economía más sostenible.

Dentro de los numerosos componentes que conforman un automóvil, el tanque de agua, a menudo fabricado con plásticos convencionales, representa un área significativa para la mejora en términos de sostenibilidad. Aunque su función es esencial para el funcionamiento del vehículo, su ciclo de vida ha sido poco estudiado en comparación con otros elementos más prominentes. Este componente no solo implica una huella ambiental considerable durante su producción y disposición final, sino que también presenta oportunidades para integrar

prácticas circulares que podrían mitigar su impacto.

La industria automotriz es una de las principales responsables de la generación de residuos y emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global [1]. A medida que la demanda de vehículos continúa creciendo, también lo hacen las preocupaciones sobre el impacto ambiental asociado con su producción, uso y disposición final. En este contexto, la sostenibilidad se ha convertido en un imperativo para los fabricantes, quienes deben adaptarse a normativas ambientales cada vez más estrictas y a la creciente presión social por prácticas más responsables.

La economía circular ofrece un marco prometedor para abordar estos desafíos. Este enfoque propone una transformación en el diseño y gestión de productos, promoviendo la reutilización, el reciclaje y la reducción del consumo de recursos. Sin embargo, su aplicación en componentes específicos como el tanque de agua aún no ha sido suficientemente explorada. La falta de datos sobre el rendimiento ambiental y las prácticas circulares aplicables a este componente impide que los fabricantes implementen estrategias efectivas que podrían mejorar su sostenibilidad.

II. Marco Teórico

El tanque de agua automotriz es un depósito abierto que facilita la evaporación y fuga de vapores por efectos térmicos del motor, y es producido a base de polipropileno (PP), homopolímero con aditivos ignífugos, con un diseño que incluye un depósito de decantación y acceso para mantenimiento [2]. Entre el impacto ambiental de su fabricación con PP se estiman 10.63 kg eq. de toxicidad humana-año, 23 kg eq. de calentamiento global, y otros efectos en ozono, oxidantes fotoquímicos, acidificación y eutrofización [3,4].

La gestión de polímeros automotrices representa un desafío. Fabricantes como Ford implementan programas de reciclaje sostenible, y existen centros autorizados para tratamiento y reciclaje de vehículos [5]. Desde 2013, la Comisión Europea promueve la reutilización y reciclaje de componentes automotrices, reconociendo su potencial económico y ambiental [6].

A. La economía Circular y la Industria Automotriz

La economía circular es fundamental para el desarrollo sostenible de la industria automotriz [7], promoviendo la creación de productos duraderos y el uso de materiales reciclados. Este enfoque busca mantener la utilidad y el valor de los productos mientras se reduce el impacto ambiental [8,9], siendo esto importante dado el aumento en la demanda de vehículos. La economía circular implica el uso racional de materias primas, menor generación de residuos y reducción de emisiones [10].

La industria automotriz ha adoptado principios de economía circular a través de estrategias de gestión de materiales, tratamiento de desechos y uso de combustibles alternativos [9]. Los factores que influyen en la adopción de la sostenibilidad incluyen certificaciones ISO, cumplimiento de emisiones de carbono, igualdad de género y desarrollo humano [11]. Las empresas se han visto obligadas a modificar sus métodos de producción en respuesta a demandas gubernamentales y ambientales [12].

En el caso de la Unión Europea se ha establecido objetivos específicos, como el límite de 95g de CO_2 por kilómetro desde 2021, que se reducirá a 61.75g para 2030, junto con el Pacto Verde Europeo que busca la neutralidad climática para 2050 [13]. Sin embargo, estudios muestran que el cumplimiento de normas ambientales en el sector automotriz mexicano es insuficiente, con solo poco más de la mitad de las empresas adhiriéndose a los estándares establecidos [14]. Las pequeñas empresas, como talleres de reparación, también juegan un papel crucial en el impacto ambiental del sector ya que son las menos reguladas.

B. Ciclo de Vida y Análisis de Ciclo de Vida

La definición de Ciclo de Vida (CV) se relaciona con las etapas de vida de un producto, esto es desde su creación hasta su eliminación o reciclaje [15]. En el ámbito industrial, el ciclo de vida se centra en cómo un producto afecta al medio ambiente a lo largo de su existencia.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se refiere a una metodología para evaluar todas las etapas del ciclo de vida de un producto, con el objetivo de identificar el impacto ambiental desde la extracción de materias primas, producción, distribución y disposición final, cuantificando estos impactos con indicadores como huella de carbono, consumo de energía y generación de residuos [16], de tal forma que se obtenga información para la toma de decisiones empresariales y la implementación de prácticas más sostenibles, promoviendo así la mejora continua en los procesos productivos.

El ACV es fundamental para promover prácticas sostenibles en la industria, ya que permite a las empresas:

- Comprender mejor el impacto ambiental total de sus productos.
- Identificar oportunidades para reducir costos y mejorar la eficiencia.
- Cumplir con regulaciones ambientales y responder a la demanda creciente por productos sostenibles

C. Innovaciones Tecnológicas y Prácticas Sostenibles en la Industria Automotriz

La relevancia que la economía circular está tomando para el sector automotriz es fundamental para proteger los recursos naturales y reducir el impacto ambiental de los residuos que genera [17]. Las baterías de iones de litio son clave en este contexto, ya que se utilizan en diversas aplicaciones, desde dispositivos electrónicos hasta vehículos eléctricos. Estas baterías incluyen sistemas que gestionan la temperatura, la seguridad y el almacenamiento de energía, lo que las hace altamente versátiles [18].

El reciclaje en la actualidad es de vital importancia, este proceso contribuye a disminuir el impacto ambiental, materiales como papel, plástico y metales vuelven a ser utilizados contribuyendo así a reducir la extracción de materias

vírgenes, aunque en México solo se recicla alrededor del 6% de los residuos generados, en contraste con el 36.2% en la Unión Europea [19-22]. En el sector automotriz, se están implementando estrategias que incluyen el reciclaje, por ejemplo, la recolección y transformación de envases de lubricantes usados [23].

D. Perspectivas y Tendencias en la Sostenibilidad Ambiental de la Industria Automotriz Mexicana

La transición hacia una economía circular es esencial para proteger los recursos naturales y reducir el impacto ambiental de los residuos, especialmente en la industria automotriz [23,24]. La industria automotriz debe adoptar un enfoque proactivo hacia la sostenibilidad, integrando prácticas de reciclaje y reutilización, y fomentando la innovación en el diseño de productos y procesos. Esto no solo beneficiará al medio ambiente, sino que también mejorará la competitividad y la imagen del sector.

E. Impacto Ambiental del Tanque de Agua Automotriz

La fabricación del tanque de agua automotriz genera múltiples impactos ambientales a lo largo de su ciclo de vida. En su producción, la extracción de materias primas como el petróleo causa degradación de hábitats y contaminación de suelos y agua [25], mientras que su fabricación genera emisiones atmosféricas y residuos químicos [26]. Durante su uso, las variaciones de temperatura y presión pueden provocar fugas que contaminan el entorno, además de contribuir a la huella ecológica del vehículo. Al final de su vida útil, el principal desafío es el reciclaje adecuado del plástico, ya que su incorrecta disposición contribuye a la acumulación de residuos en vertederos y océanos. Sin embargo, la industria está buscando alternativas más sostenibles, como el uso de termoplásticos con fibra de vidrio que ofrecen mayor resistencia y menor peso, mientras que la Unión Europea ha implementado restricciones y regulaciones para reducir el impacto ambiental de los productos plásticos desde julio de 2021 [6].

III. METODOLOGÍA

Las etapas para la realización de este estudio son:

1. Se definió un caso de estudio de una empresa operando en economía circular, con los elementos mínimos esenciales de esta forma de operación y se desarrolló un simulador del sistema.
2. En base a distribuciones de probabilidad de los parámetros básicos del sistema, se usó el simulador para obtener las distribuciones de probabilidad de las variables que miden el desempeño de la empresa.
3. Se seleccionaron las variables para medir el logro de los objetivos económico y ambiental de la fábrica, y se integraron en una función de utilidad aditiva.
4. Las distribuciones de probabilidad de las variables y la función de utilidad se incluyeron en árboles de decisión.
5. Se construyeron gráficas representando las decisiones recomendadas para distintas distribuciones de probabilidad de los parámetros básicos y valores de los pesos en la función de utilidad.

IV. RESULTADOS

A. Caso de Estudio y Modelo de Simulación

Se considera una fábrica que vende un producto en un esquema de economía circular, donde los clientes pueden regresar voluntariamente el producto al terminarse su vida útil (producto usado). La fábrica reacondiciona el producto usado y lo pone a la venta otra vez.

La fábrica cuenta con un inventario de producto terminado, al que llegan los clientes de acuerdo con un tiempo entre llegadas Δt_{LL}. Cada cliente requiere una cantidad q_C de producto y, si el inventario de producto terminado (I_{PT}) es menor a q_C , el consumo de este cliente se pierde.

Si el inventario de producto terminado cae por debajo de un valor mínimo ($I_{PT,MIN}$), la empresa activa la producción a partir de materia prima de un almacén. La producción genera lotes de tamaño q_P, tomando un tiempo Δt_P para procesar cada uno. La producción se detiene si el inventario de producto terminado llega a su máximo $I_{PT,MAX}$. Se considera que la disponibilidad de materia prima es muy amplia.

Cuando un cliente realiza una compra, existe una probabilidad p_R de que, terminada la vida útil del producto, lo entregue a la fábrica como producto usado en vez de desecharlo. El tiempo que transcurre entre que el cliente se lleva producto y lo regresa como producto usado se denomina Δt_R. El inventario de producto usado en la fábrica, I_{PU}, tiene un cupo máximo de $I_{PU,MAX}$. El reacondicionamiento de producto usado produce lotes de tamaño q_{PR}, que son enviados al almacén de producto terminado. El tiempo que toma procesar cada lote es Δt_{PR}. Si se cuenta con suficiente producto usado ($I_{PU} \geq q_{PR}$), el reacondicionamiento sigue activo mientras no se alcance el inventario máximo de producto terminado. Si al momento que llega un cliente con producto usado, este encuentra lleno el almacén de estos productos ($I_{PU}=I_{PU,MAX}$), el producto usado que traía el cliente se desecha.

La Fig. 1 muestra el sistema, indicando la distribución de probabilidad de algunas de las variables. Se usa la notación *Uniforme*(a, b) para referirse a una variable aleatoria distribuida uniformemente entres los valores a y b, y *Expo*$(1/\lambda)$ para referirse a una variable aleatoria exponencial con promedio $1/\lambda$. En las simulaciones, se usó Δt_{LL} distribuida exponencialmente con promedio de 30 unidades de tiempo, q_C distribuida uniformemente entre 20 y 40 artículos, y los tamaños de lote q_P y q_{PR} iguales a 20 artículos. El horizonte de simulación fue de 5000 unidades de tiempo y las distribuciones de probabilidad y promedios fueron calculados con 5000 réplicas. Al inicio, el inventario de producto terminado está en su valor máximo, y el inventario de producto usado vacío.

Se definen tres posibilidades para el grado de disposición de los clientes para traer a la fábrica sus productos que hayan agotado su vida útil.

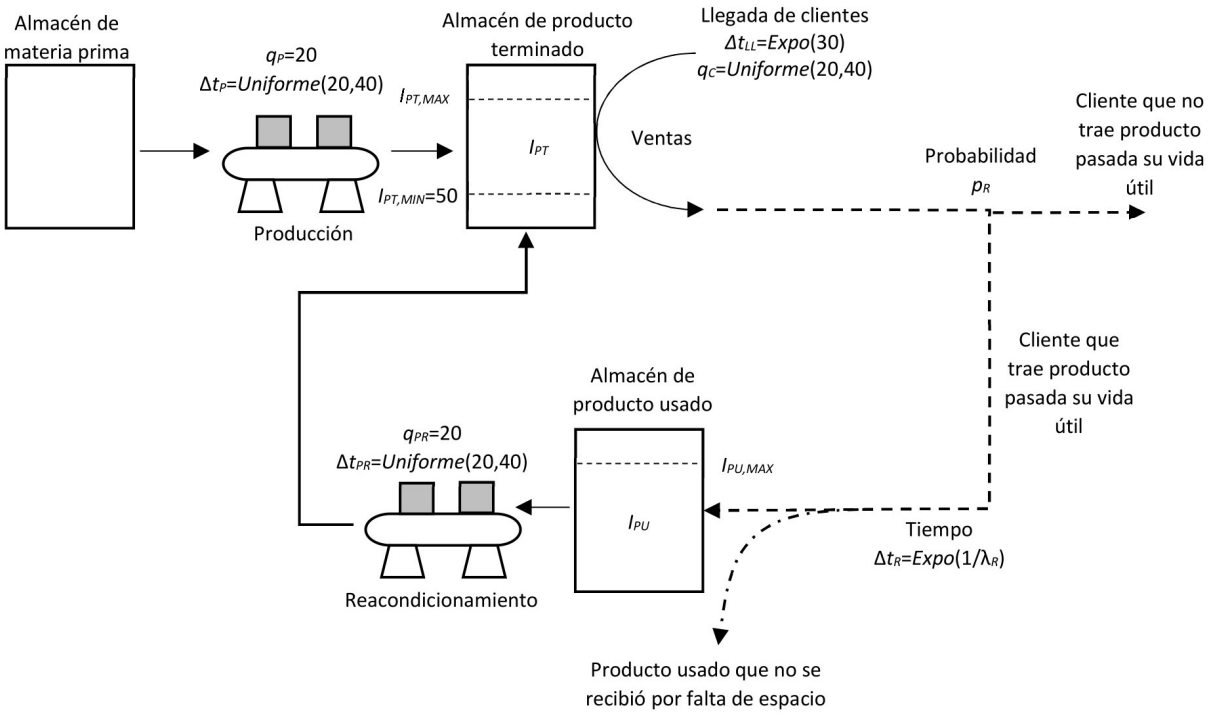

Fig. 1. Caso de Estudio

TABLA I
CARACTERIZACIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE LOS CLIENTES PARA TRAER SUS PRODUCTOS USADOS

Afluencia de producto usado	p_R	Promedio de Δt_R=1/λ_R
Baja	0.3	1500
Mediana	0.5	1000
Alta	0.7	500

Para valores $I_{PT,MAX}$=$I_{PU,MAX}$=150, las Figs. 2 a 4 muestran el comportamiento de los inventarios de producto terminado y usado, I_{PT} e I_{PU}, para una réplica de simulación, en los casos de afluencia de producto usado baja, media y alta.

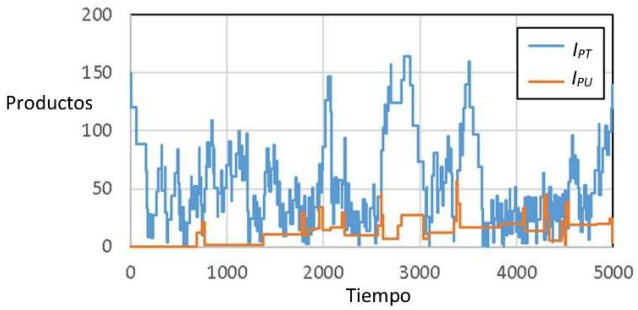

Fig. 2. Inventarios de producto terminado y usado, afluencia de productos usados baja

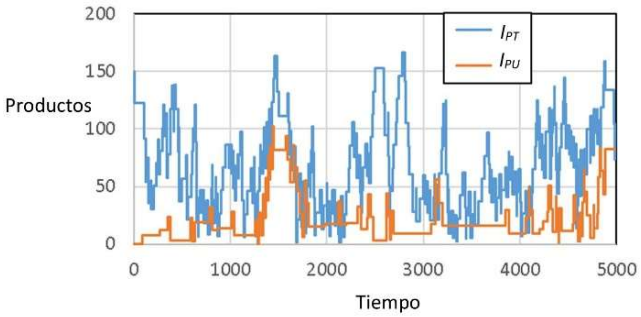

Fig. 3. Inventarios de producto terminado y usado, afluencia de productos usados mediana

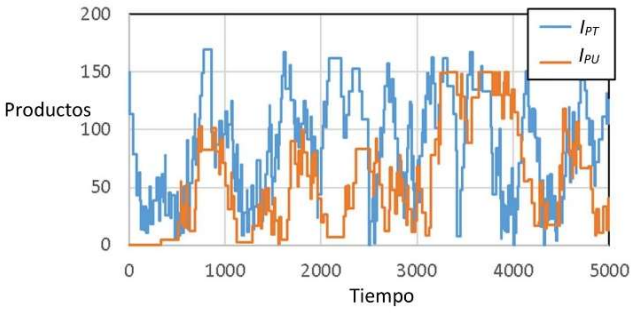

Fig. 4. Inventarios de producto terminado y usado, afluencia de productos usados alta

En la Fig. 2, se observa que, si hay baja afluencia de clientes con producto usado, el inventario de producto usado permanece casi vacío. mientras que, si hay una afluencia alta, este inventario alcanza su ocupación máxima en algunas ocasiones (Fig. 4). El producto usado que llegó en condiciones de inventario lleno no fue admitido por la fábrica.

Las distribuciones acumulativas de probabilidad de las ventas (N_{VEN}) y del producto usado traído por los clientes que no cupo en el almacén de este tipo de producto ($N_{PU,SC}$) se muestran en la Fig. 5.

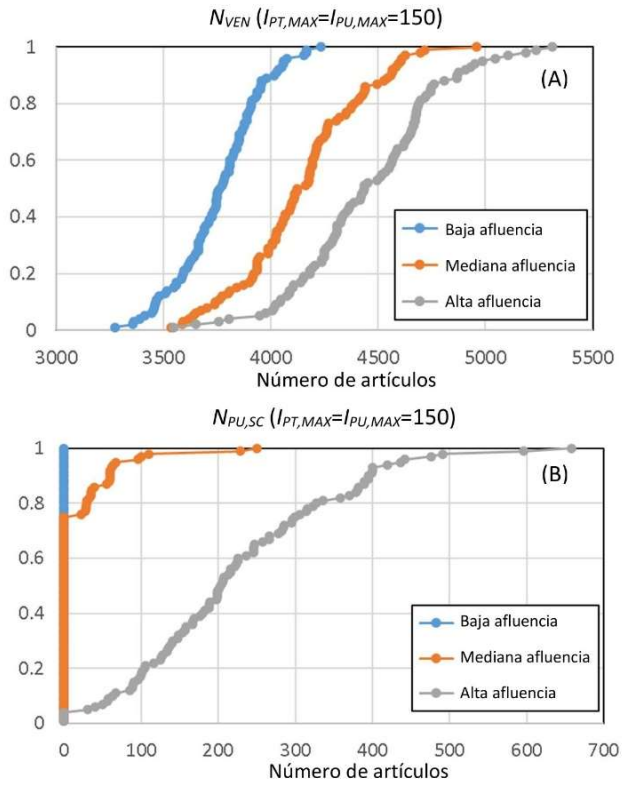

Fig. 5. Distribuciones acumulativas de probabilidad para (A) N_{VEN} y (B) $N_{PU,SC}$ dados $I_{PT,MAX}$=$I_{PU,MAX}$=150

En la primera gráfica de la Fig. 5, se observa que a mayor afluencia de producto usado se tienen mayores ventas. Esto se debe a que el proceso de reacondicionamiento genera producto terminado adicional, que resulta en una mayor disponibilidad de producto para la venta y menor número de clientes perdidos. Del mismo modo, si la afluencia de producto usado aumenta, $N_{PU,SC}$ lo hace también. En los casos de baja y mediana afluencia de producto usado existe una alta probabilidad de que todos los productos usados traídos por los clientes entren al almacén ($N_{PU,SC}$=0), mientas que para afluencia alta $N_{PU,SC}$ puede valer más de 600.

La influencia de p_R y Δt_R en distintas métricas de desempeño de la fábrica se muestra en las gráficas de la Fig. 6. Se incluye N_{PR}, que es el número de productos procesados a partir de materia prima, N_{REA} es el número de productos reacondicionados, N_{VEN} es el total vendido durante el periodo y $N_{PU,SC}$ es el total de productos usados traídos que no cupieron en el inventario correspondiente.

B. Modelo de Decisión

Se considera que la fábrica debe dividir un espacio total de almacenamiento para 300 productos, entre los almacenes de producto terminado y usado. Esto es, seleccionar $I_{PT,MAX}$ y $I_{PU,MAX}$ tales que $I_{PT,MAX}$ + $I_{PU,MAX}$=300. Se examinan tres alternativas de división (diseños) del espacio total.

- Mayor inventario de producto terminado [$I_{PT,MAX}$=200, $I_{PU,MAX}$=100]
- Inventarios iguales [$I_{PT,MAX}$= $I_{PU,MAX}$=150]
- Mayor inventario de producto usado [$I_{PT,MAX}$=100, $I_{PU,MAX}$=200]

Uno de los beneficios de la cadena circular es que el reacondicionamiento de productos usados evita desecharlos, disminuyendo la contaminación. Entonces, el desempeño de la cadena circular debe considerar un efecto ambiental además del desempeño económico. El objetivo económico se mide por las ventas totales (N_{VEN}) y el ambiental por la cantidad de productos usados traídos por los clientes que no cupieron en inventario ($N_{PU,SC}$), entendiendo que estos tienen que ser desechados y generan un impacto ambiental directo. Si bien en este trabajo se toma esta métrica, la operación del sistema puede impactar el ambiente de otras formas, como, por ejemplo, mediante el consumo de recursos naturales y energía.

Los valores esperados de estas variables, para los distintos diseños de inventario y afluencia de productos usados alta, media y baja se muestran en las Tablas 2 y 3.

TABLA 2
VALOR ESPERADO DE LAS VENTAS E[N_{VEN}]

Diseño	Afluencia de producto usado		
	Baja [p_R =0.3, $1/\lambda_R$=1500]	Mediana [p_R =0.5, $1/\lambda_R$=1000]	Alta [p_R =0.7, $1/\lambda_R$=500]
[$I_{PT,MAX}$=200, $I_{PU,MAX}$=100]	3886	4273	4542
[$I_{PT,MAX}$= $I_{PU,MAX}$=150]	3743	4118	4411
[$I_{PT,MAX}$=100, $I_{PU,MAX}$=200]	3480	3812	4109

TABLA 3
VALOR ESPERADO DE $N_{PU,SC}$ (E[$N_{PU,SC}$])

Diseño	Afluencia de producto usado		
	Baja [p_R =0.3, $1/\lambda_R$=1500]	Mediana [p_R =0.5, $1/\lambda_R$=1000]	Alta [p_R =0.7, $1/\lambda_R$=500]
[$I_{PT,MAX}$=200, $I_{PU,MAX}$=100]	1	34	289
[$I_{PT,MAX}$= $I_{PU,MAX}$=150]	0	10	214
[$I_{PT,MAX}$=100, $I_{PU,MAX}$=200]	0	2	158

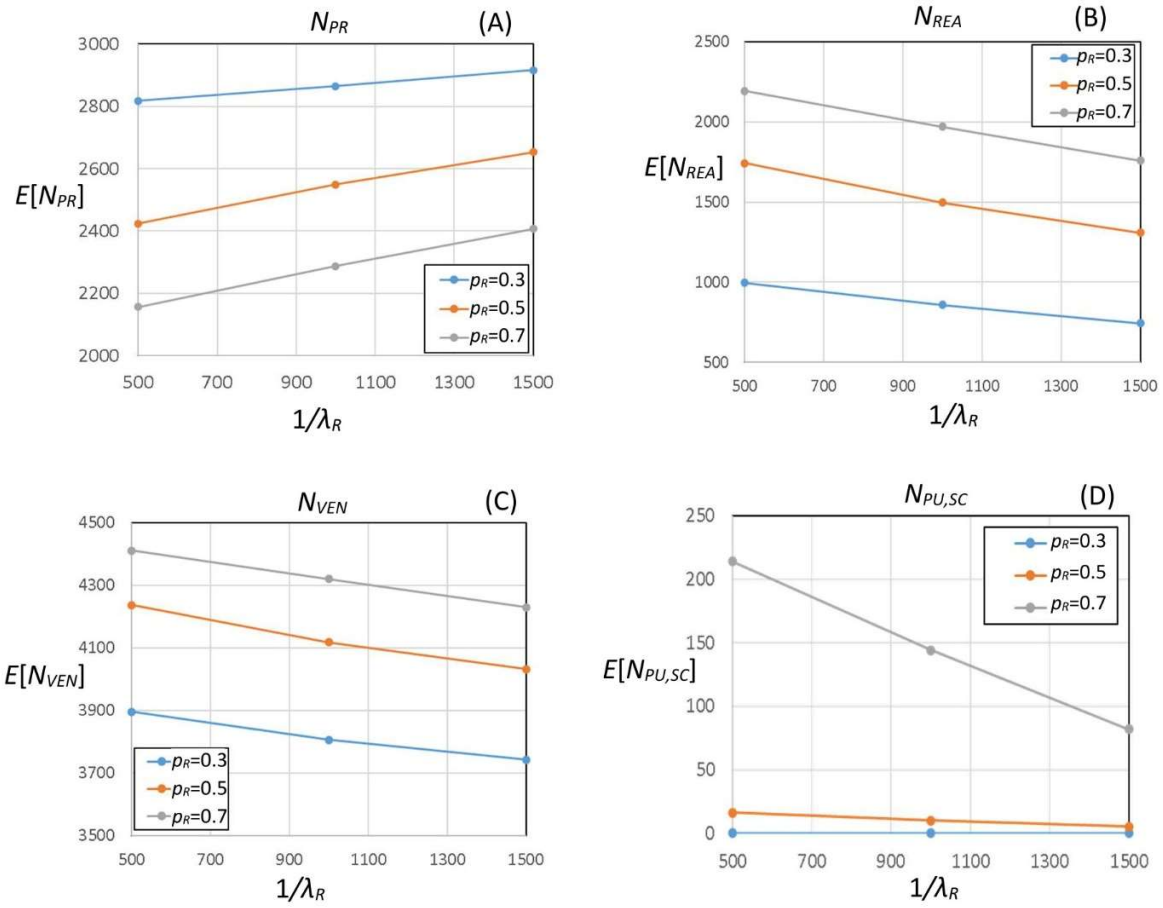

Fig. 6. Influencia de p_R y $1/\lambda_R$ en los promedios de (A) número de productos producidos desde materia prima (N_{PR}), (B) productos reacondicionados (N_{REA}), (C) ventas (N_{VEN}) y (D) rechazados ($N_{PU,SC}$)

Se propone una función de utilidad aditiva para evaluar el desempeño de las alternativas

$$U=k_E U_E(\mathrm{E}[N_{VEN}])+k_A U_A(\mathrm{E}[N_{PU,SC}]) \quad (1)$$

Donde U_E y U_A son funciones de utilidad lineal sobre los valores de $E[N_{VEN}]$ y $E[N_{PU,SC}]$ respectivamente.

$$U_E(E[N_{VEN}]) = \frac{E[N_{VEN}]-E[N_{VEN}]_{MIN}}{E[N_{VEN}]_{MAX}-E[N_{VEN}]_{MIN}} \quad (2)$$

$$U_A(E[N_{PU,SC}]) = \frac{E[N_{PU,SC}]_{MAX}-E[N_{PU,SC}]}{E[N_{PU,SC}]_{MAX}-E[N_{PU,SC}]_{MIN}} \quad (3)$$

Los pesos k_E y k_A son valores positivos que suman uno, y dependen de la importancia relativa que dé el tomador de decisiones al objetivo económico respecto del ambiental. Definiendo p_B, p_M y p_A respectivamente como las probabilidades de una baja, mediana o alta afluencia de producto usado, la selección de una alternativa de distribución del inventario se plantea como el árbol mostrado en la Fig. 7.

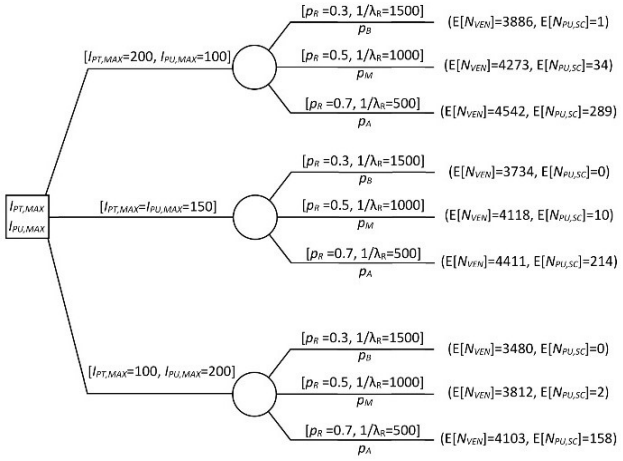

Fig. 7. Árbol de decisión

Los valores máximos y mínimos para las ecuaciones 2 y 3 son $\mathrm{E}[N_{VEN}]_{MAX}$=4542, $\mathrm{E}[N_{VEN}]_{MIN}$=3480, $\mathrm{E}[N_{PU,SC}]_{MAX}$=289,

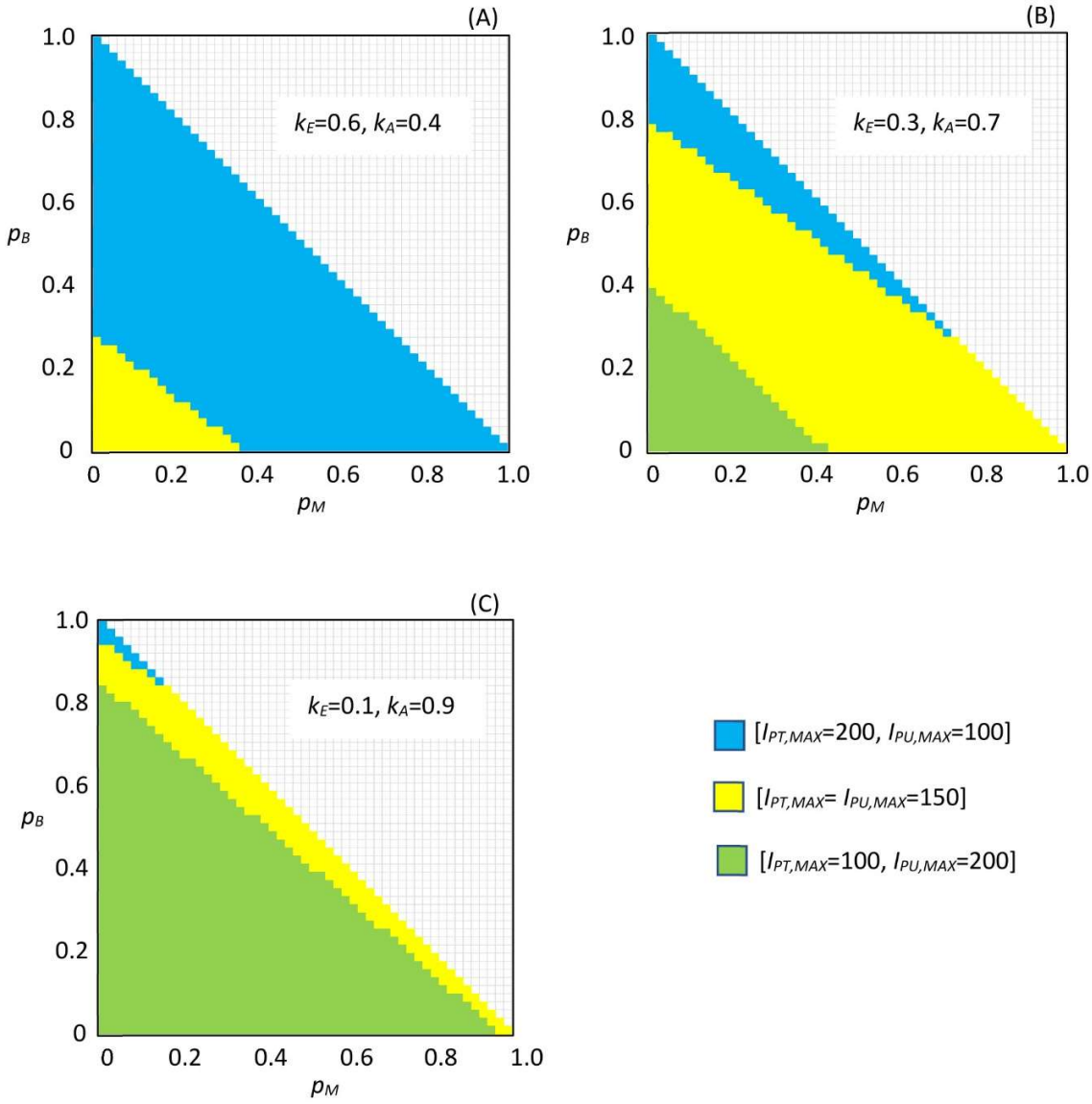

Fig. 8. Diseño recomendado de acuerdo con los pesos de la función de utilidad y probabilidades de afluencia de producto usado para (A) Aspecto económico más importante, (B) Aspecto ambiental más importante, (C) Aspecto ambiental mucho más importante

$E[N_{PU,SC}]_{MIN}=0$. La alternativa recomendada, para distintos valores de las probabilidades p_B y p_M (con p_A igual al complemento a 1) y para tres casos de ponderaciones k_E y k_A de la función de utilidad, se muestra en la Fig. 8.

V. Discusión

En la Fig. 8 se muestra que el diseño recomendado depende de las preferencias del tomador de decisiones. Si estas están cargadas al desempeño económico (un valor mayor de k_E) se recomienda aumentar el inventario de producto terminado. A medida que se aumenta la preferencia por el objetivo ambiental (un mayor valor de k_A) se favorece la distribución con mayor inventario de producto usado.

De la misma forma, una mayor probabilidad de una afluencia alta de clientes con producto usado (cerca del origen de las gráficas en la Fig. 8) favorece a los diseños con mayor inventario destinado a estos productos. Cuando existe un marcado énfasis en el objetivo ambiental sobre el económico (k_A=0.9) la preferencia es para un diseño que prevea un mayor espacio de inventario para producto usado, para casi todas las probabilidades, excepto cuando se está casi seguro que no ocurrirá una afluencia alta de producto usado ($p_A \rightarrow 0$, sobre la diagonal de las gráficas de la Fig. 8).

VI. CONCLUSIONES

La cadena de suministro circular tiene ventajas tanto económicas como ambientales. En el primer caso, el reacondicionar productos usados puede ser más económico que producirlos a partir de materia prima. En el segundo aspecto, la reutilización de productos gastados evita que estos se desechen, y contribuyan a la contaminación ambiental.

Sin embargo, la planeación y manejo de estos sistemas se complica al deber tomar en cuenta la incertidumbre sobre qué tan dispuestos estarán los clientes a reintegrar a la fábrica sus productos usados.

Esto se suma a la incertidumbre relativa a las ventas, tiempos de producción, de entrega de materia prima, etc., que son comunes tanto a estas cadenas como a los sistemas abiertos.

Aquí se muestra el uso de simulación de procesos y herramientas de Análisis de Decisiones para modelar una decisión sobre división del espacio de inventario en un prototipo de empresa operando en economía circular. La simulación estocástica permite convertir la incertidumbre sobre parámetros del problema en distribuciones de probabilidad de las métricas de desempeño, mientras que una función de utilidad valora estas métricas respecto de los objetivos económico y ambiental. Las distribuciones de probabilidad y la función de utilidad son integradas por árboles de decisión, que permiten identificar la alternativa recomendada.

Los resultados se presentan como gráficas que muestran el diseño recomendado dadas las probabilidades del nivel de afluencia de producto usado y la preferencia entre el objetivo económico y el ambiental. Dadas las preferencias del decisor, expresadas como pesos de la función de utilidad, y su conocimiento sobre el comportamiento de los clientes, traducido en probabilidades, la coloración de la gráfica correspondiente en la Fig. 8, permite escoger la partición más conveniente del espacio de almacén. En forma más general, los parámetros y/o forma del modelo de simulación pueden adaptarse a la situación práctica que se trate, y, siguiendo el procedimiento mostrado, producir gráficas de diseños recomendados análogas a la Fig. 8.

Si bien se aborda una decisión de dividir el espacio de inventario en una cadena simplificada que incluye solo los elementos esenciales propios de la economía circular, el procedimiento puede extenderse a otras decisiones relativas a la operación del sistema, mostrando como la incertidumbre y objetivos de la situación específica resultan en la selección de una alternativa.

VII. REFERENCIAS

[1] SinCarbono, 2023. [En línea]. disponible en: https://sincarbono.io/emisiones-de-las-empresas-automotrices/#:~:text=La%20industria%20automotriz%20produce%20varios,los%20gases%20de%20efecto%20invernadero.

[2] mexpolimeros. 2023. [En línea]. Disponible en https://www.mexpolimeros.com/app/tanque-de-expansion.html [Accesado 2 de octubre de 2024].

[3] ecoinvent. 2024. [En línea]. Disponible en https://ecoinvent.org/database/ [Accesado el 2 de octubre de 2024]

[4] Deloitte. Analisis de Ciclo de Vida (ACV). 2012. [En línea]. Disponible en https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/mx/Documents/risk/Sustentabilidad/mx(es-mx)Boletin_Sustentabilidad_Nov12.pdf

[5] Ford. 2024. [En línea]. Disponible en https://www.ford.es/experiencia-ford/sostenibilidad/recicla-tu-ford

[6] CEU. Diario Oficial de la Unión Económica Europea. 2013. [En línea]. Disponible en https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:C:2013:280:FULL

[7] O.G. Gonzalez y H.J. Vargas, "A economía circular como filosofía da economía verde e como estratexia de responsabilidade social," *Ambientalmente sustentable*, vol. 2. no. 22, pp. 49-61. 2016. https://doi.org/https://doi.org/10.17979/ams.2016.02.022.3335

[8] L.J. Ortiz y L.B. Plaza, Dspace. 2017. [En linea]. Disponible en http://repositorio.unemi.edu.ec/handle/123456789/3804

[9] S.V. Prieto, M. García, y M. Ormazabal, "Economía circular: relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación," *Memorias en investigaciones en ingeniería*, pp. 89-95, 2017.

[10] Parlamento Europeo. 2023. [En linea]. Disponible en https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios

[11] M.J. Del Angel, M.J Galindo, y P.F. López, "Panorama teórico de la adopción de la sostenibilidad en la industria automotriz," *Vincula Tégica EFAN*, vol. 9, no. 6, Nov-Dic, 2023. https://doi.org/https://doi.org/10.29105/vtga9.6-458

[12] M.Y. Cuéllar, "The circular economy a practice to support of environmental protection", 2023. [En línea].

[13] A. Astorhoschen, "Una revisión de la legislación europea sobre residuos y su papel en la transformación hacia una economía circular," *Revista Técnica de Medio Ambiente.* 2024. [En línea]. Disponible en https://www.retema.es/actualidad/una-revision-de-la-legislacion-europea-sobre-residuos-y-su-papel-en-la-transformacion

[14] A.R. González, A.B. Ivanova, A.R. Macías, y M.J. Castillo, "Cumplimiento de normas ambientales en el subsector fabricación de equipo de transporte en las regiones centro occidente y norte de México," *Revista Interamericana de ambiente y turismo*, vol. 15, no. 2, pp. 103-112. 2019. https://doi.org/10.4067/S0718-235X2019000200103

[15] Concepto. 2024. [En línea]. Disponible en https://concepto.de/ciclo-de-vida/

[16] A. Riveros, EALDE. 2020 [En línea]. Disponible en https://www.ealde.es/definicion-ciclo-vida-proyecto/

[17] L.M. Ortega, Plastics Technology México. 2024. [En linea]. Disponible en https://www.pt-mexico.com/articulos/reciclaje-de-plasticos-como-eje-de-la-economia-circular

[18] C.V. Romero, A.J. Ccasani, R.C. Rivadeneyra, y R.J. Altamirano, "Prospectivas del uso de vehículos con batería ion-litio y desarrollo sostenible en Sudamérica," *Revista Kawsaypacha sociedad y medio ambiente*, no. 11, 2023. https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202301.A008

[19] Arratibel, El dilema de México y sus siete millones de toneladas de basura plástica. 2023. [En línea]. Disponible en https://elpais.com/america-futura/2023-01-20/el-dilema-de-mexico-y-las-siete-millones-de-toneladas-de-plastico-que-acaban-en-la-basura-o-en-el-mar.html

[20] D.L. Ochoa, SPCPro. 2023. [En línea]. Disponible en https://spcpro.com/2023/03/economia-circular-en-la-industria-automotriz/

[21] M. Reynoso, y C. Celestino, "Impacto de los residuos de la industria automotriz". *Instituto Tecnológico de Santo Domingo*. 2023.

[22] desguaces.net. 2024. [En línea]. Disponible en https://www.desguaces.net/blog/el-reciclaje-de-vehiculos-las-etapas-del-proceso-de-descontaminacion-y-despiece/

[23] A. M. Brunal, Universidad Pontificia Bolivariana. 2023. [En línea]. Disponible en https://www.upb.edu.co/es/central-blogs/sostenibilidad/economia-circular-en-la-industria-automotriz-2023-monteria

[24] Capgemini. Informe de la industria automotriz en la era de la sostenibilidad. 2020. [En línea]. Disponible en https://www.capgemini.com/mx-es/news/press-releases/informe-de-la-industria-automotriz-en-la-era-de-la-sostenibilidad/

[25] C.E. Llanes, y M.J. Leguisamo, "What is the reality of car washes regarding sustainability and environmental responsibility?," *Journal of Environmental Sciences*, pp. 1-12, 2021.

[26] G.C. Lara, S.F. Mendoza, D.G. López, y S.A. Gutierrez, Instituto Mexicano del Transporte. 2010. [En línea]. Disponible en https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=343&IdBoletin=125