


Optimización de la Cadena de Suministro en Centrales Azucareras mediante Simulación de Eventos Discretos y Redes de Petri: Un Enfoque para la Eficiencia Operativa

Optimization of the Supply Chain in Sugar Mills through Discrete Event Simulation and Petri Nets: An Approach to Operational Efficiency

¹Parra Ortega Carlos Arturo, ¹García Mogollón Javier Mauricio*, ²Sánchez Castillo Verenice

¹Universidad de Pamplona, Facultad de Ciencias de Económicas y Empresariales, Programa Administración. Grupo de Investigación en GICE. Campus universitario, Barrio el Buque, Pamplona, Norte de Santander, Colombia. ✉

Correo electrónico: carapa@unipamplona.edu.co,  <https://orcid.org/0000-0001-7423-8909> ✉ Correo electrónico: jmgmogollon@unipamplona.edu.co,  <https://orcid.org/0000-0003-3593-9504>

²Universidad de Amazonia, Docente Tiempo Completo. Grupo de Investigación GIADER– Florencia, Amazonas, Colombia. ✉ Correo electrónico: ve.sanchez@udla.edu.co  <https://orcid.org/0000-0002-3669-3123>

Recibido: noviembre 21 de 2024; Aprobado: marzo 30 de 2025; Publicado: abril 01 de 2025

RESUMEN

La eficiencia operativa en las Centrales Azucareras (CAZ) depende de una planificación óptima en la cadena de suministro, donde la cosecha, el transporte y la entrega de caña de azúcar deben estar sincronizados para evitar interrupciones en la producción. Este estudio emplea simulación por eventos discretos (DEVS) y redes de Petri para modelar y analizar la dinámica operativa de una CAZ bajo diferentes enfoques de coordinación: sin coordinación, coordinación centralizada y coordinación descentralizada supervisada. La metodología utilizada permite evaluar la asignación de recursos y su impacto en la eficiencia operativa. Los resultados de la simulación demuestran que la coordinación descentralizada supervisada optimiza el flujo de

44

*** Parra Ortega Carlos Arturo, García Mogollón Javier Mauricio ^{2,1*}, Verenice Sánchez Castillo²**

insumos, reduciendo costos operativos y mejorando la utilización de cosechadoras y camiones. Se observó que la falta de planificación adecuada genera interrupciones en la producción y costos adicionales, mientras que un sistema de supervisión basado en redes de Petri mejora la asignación de recursos y la estabilidad del sistema productivo. Se concluye que el uso de modelos de simulación computacional permite evaluar estrategias logísticas en la industria azucarera, proporcionando herramientas para optimizar la toma de decisiones y mejorar la sostenibilidad del sector. La implementación de modelos de control supervisorio y automatización en la gestión de la cadena de suministro es clave para incrementar la competitividad y reducir la variabilidad en la producción de azúcar.

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia ²Sánchez Castillo Verénice ✉ Correo electrónico: ve.sanchez@udla.edu.co



Palabras clave: Simulación por eventos discretos, redes de Petri, cadena de suministro, centrales azucareras, optimización logística.

ABSTRAC

The operational efficiency of Sugar Mills (CAZ) depends on optimal supply chain planning, where sugarcane harvesting, transportation, and delivery must be synchronized to prevent production disruptions. This study employs Discrete Event Simulation (DEVS) and Petri Nets to model and analyze the operational dynamics of a CAZ under different coordination approaches: uncoordinated, centralized coordination, and supervised decentralized coordination. The methodology used evaluates resource allocation and its impact on operational efficiency. Simulation results show that supervised decentralized coordination optimizes input flow, reduces operating costs, and improves the utilization of harvesters and trucks. It was observed that inadequate planning leads to production interruptions and additional costs, whereas a

supervision system based on Petri Nets enhances resource allocation and production system stability. It is concluded that the use of computational simulation models enables the evaluation of logistical strategies in the sugar industry, providing tools to optimize decision-making and improve sector sustainability. The implementation of supervisory control models and automation in supply chain management is essential to increase competitiveness and reduce variability in sugar production.

Keywords: Discrete Event Simulation, Petri Nets, Supply Chain, Sugar Mills, Logistics Optimization.

INTRODUCCIÓN

El funcionamiento continuo de una Central Azucarera (CAZ) es un desafío significativo debido a la complejidad inherente a la gestión de la cadena de suministro. Una vez que la planta de producción inicia operaciones, debe mantener un flujo constante de productos terminados, como el azúcar y sus derivados, materias primas importantes para la industria de alimentos (Sánchez y Caballero, 2019; Calsada *et al.*, 2022; Sánchez Castillo, 2024). Este flujo continuo depende, a su vez, de un abastecimiento adecuado de insumos, especialmente la caña de azúcar, la cual se cosecha en granjas

ubicadas a diferentes distancias de la planta procesadora. De esta manera, la coordinación de la cosecha y el transporte de caña de azúcar son cruciales para asegurar que la planta funcione sin interrupciones. Según Jiménez *et al.*, (2005), los sistemas logísticos en plantas de procesamiento requieren un enfoque de modelado que permita evaluar las dinámicas operativas y optimizar la asignación de recursos.

En este contexto, la planificación de los despachos desde las granjas de caña hacia el CAZ se presenta como un problema de asignación de recursos que

involucra una serie de eventos interdependientes y de alta complejidad. La sincronización de los despachos es esencial para garantizar que los insumos lleguen a la planta de manera oportuna y en cantidades adecuadas para mantener la operación continua. Además, la variabilidad en los tiempos de cosecha y la disponibilidad de los recursos de transporte representa un reto adicional. Así, este artículo tiene como objetivo presentar un método de asignación de recursos basado en unidades descentralizadas, comparándolo con un sistema de planificación centralizada y un esquema sin planificación. La validación de este modelo se realiza mediante simulación por eventos discretos (DEVS), empleando redes de Petri para el control y supervisión del sistema logístico.

El estudio de modelos logísticos en plantas de proceso ha sido abordado en diversos trabajos anteriores. Acebes *et al.*, (2004) proponen el diseño de un entorno de modelado que combine sistemas de eventos discretos y continuos para simular la dinámica de la cadena de suministro. Hsieh (2004)

presenta un enfoque de control de manufactura holónica que utiliza el protocolo de negociación multi-agente Contract Net, con el fin de mejorar la coordinación en los sistemas de producción. Asimismo, Parra y Chacón (2006) emplean redes de Petri y simulación DEVS para evaluar el desempeño de sistemas de manufactura discreta. Estos enfoques permiten explorar diferentes niveles de coordinación y supervisión, contribuyendo a la optimización de los procesos en la industria azucarera.

Según Procaña (2024), Brasil, India y Tailandia representan alrededor del 70% de las exportaciones globales de azúcar. Brasil, en particular, alcanzó una producción de más de 600 millones de toneladas de caña de azúcar en su última campaña, dedicando aproximadamente la mitad de esta cantidad a la producción de etanol. Sin embargo, debido a las políticas fiscales implementadas, los precios del etanol disminuyeron, lo que motivó a Brasil a priorizar la exportación de azúcar en lugar de su uso en biocombustibles. En contraste, India experimentó dificultades

debido a una cosecha menor a la esperada, mientras que la demanda interna de azúcar aumentó significativamente, superando los 30 millones de toneladas anuales.

En Colombia, el sector azucarero enfrenta desafíos similares, en particular debido a la reducción del área cultivada en el Valle del río Cauca, lo que ha limitado la oferta de caña y generado un incremento en los precios para los productores. Según Valor y Dinero (2024), la cantidad de caña procesada disminuyó en un 3% durante el primer trimestre de 2023, consolidando una tendencia de contracción en el sector desde inicios de ese año. Entre las causas de esta situación se destacan el impacto del Fenómeno de La Niña, la diversificación hacia otros cultivos y el aumento en los costos de producción.

Dicho de otra manera, es especialmente cierto que la eficiencia operacional de un CAZ depende, en gran medida, de una logística de abastecimiento que garantice un flujo ininterrumpido de caña de azúcar desde las unidades de producción hacia la planta procesadora.

Coordinar las tareas de recolección, transporte y entrega de los insumos presenta, no obstante, un gran desafío, porque estos procesos dependen de la variabilidad de factores tales como la maduración de la caña, la disponibilidad de transporte y el congestionamiento de la planta. Como Acebes *et al.*, (2004) apuntan, la inoperante forma en que algunas cosas se organizan y administran dentro de una institución puede llevar a omisiones en la planificación eficaz, desencadenando así el estancamiento de producción, gastos imprevistos, y pérdidas financieras importantes.

Desde esta perspectiva, el enfoque de esta investigación es analizar varios métodos de coordinación logística mediante simulación, enfatizando la necesidad de mejorar la distribución de recursos para una mejor eficiencia operacional en los ingenios azucareros. En otras palabras, esta investigación busca ofrecer formas y métodos que ayuden a tomar mejores decisiones y aumentar la competitividad en la industria azucarera. La adopción de sistemas de modelado de simulación y

control supervisado, como el que se presenta en este estudio, es esencial para la sostenibilidad y el avance del sector azucarero a nivel mundial (García, 2018).

Para resolver el problema de un proyecto, es importante analizar en profundidad el problema que necesita ser tratado. En este orden de ideas, el funcionamiento efectivo de un ingenio azucarero (CAZ) se basa en un sistema de cadena de suministro que permite el flujo continuo de caña de azúcar en las fincas hacia la planta de procesamiento y en la fabricación de azúcar con sus subproductos de forma continua. Debido a que esta industria es una industria integrada verticalmente, el agroindustrial debe enfrentar un gran problema dentro de este proceso que engloba cosecha, transporte, y aprovisionamiento de insumos. Las caídas de azúcar, la productividad y la disponibilidad de cosechadores y transportistas, así como la capacidad de la planta para procesar son algunos parámetros que impactan al sistema, estos parámetros complejizan el

proceso a intervalos impredecibles (Caballero *et al.*, 2023).

A pesar de la relevancia de una planificación adecuada en la gestión de la cadena de suministro, muchos CAZ enfrentan problemas derivados de la falta de una estrategia eficiente de asignación de recursos, lo que puede provocar retrasos, costos adicionales y una disminución en la productividad. De acuerdo con Jiménez *et al.*, (2005) y Hsieh (2004), los modelos de simulación y las redes de Petri han demostrado ser herramientas efectivas para modelar sistemas logísticos complejos y optimizar los procesos de asignación de recursos en sectores industriales como el azucarero.

En este sentido, surge la necesidad de evaluar diferentes enfoques de coordinación en la logística de las CAZ, particularmente mediante el uso de modelos de simulación por eventos discretos (DEVS) y redes de Petri. Si bien la planificación centralizada ha sido una práctica común, la descentralización supervisada podría ofrecer ventajas significativas en términos de flexibilidad,

reducción de costos operativos y mejor utilización de los recursos disponibles.

Por lo tanto, la problemática central radica en la falta de una herramienta de gestión adecuada que permita optimizar la asignación de recursos, lo que podría mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y aumentar la competitividad de los CAZ. Esto es aún más relevante en el contexto de la industria azucarera, donde la demanda es creciente y la competencia global exige la mejora continua en la cadena de suministro. En este contexto se plantea la siguiente pregunta: *¿Cómo puede un sistema de asignación de recursos descentralizado supervisado, basado en simulación por eventos discretos y redes de Petri, optimizar la cadena de suministro en las Centrales Azucareras, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo los costos en comparación con la planificación centralizada y la falta de planificación?*

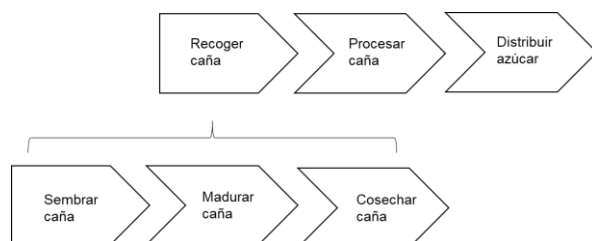


Figura 1. Cadena de valor de un CAZ

Así las cosas, un CAZ tiene a su disposición a un conjunto de granjas sembradas de caña con una extensión variable. Para cosechar esta caña hay que esperar a que esté madura, y se asignen los recursos necesarios para su cosecha: máquinas cosechadoras y camiones transportadores. Existen costos asociados a la operación de estos recursos, los cuales lo asume la granja. EL CAZ paga a los granjeros por la cantidad de caña entregada. Dado que una vez iniciada la planta de procesamiento de azúcar no puede detenerse a menos que incurra en costos inaceptables, se debe tener una cadencia de entrega de caña que posibilite que la planta esté en funcionamiento permanente. Por ejemplo, si un CAZ tiene una capacidad de procesamiento de azúcar de 700 ton/día, requiere una cadencia de 290 toneladas de caña cortada cada hora. Puesto que un camión estándar puede transportar 40 toneladas de caña en un solo viaje, se requiere de un camión cargado entrando al CAZ cada ocho minutos, aproximadamente. El problema

principal está en cómo lograr esta cadencia, dado que a) las granjas no maduran todas al mismo tiempo, lo que implica que no todas están disponibles para cosechar a la vez. b) la cantidad de cosechadoras y camiones asignados a cada granja producen cadencias distintas, dado que el tiempo de viaje de los camiones al CAZ son variables, c) la caña cortada tiene una cantidad finita de tiempo antes de descomponerse (ocho horas), de modo que una vez cosechada necesariamente debe transportarse, y d) ningún camión cargado con caña se sincroniza con los demás para llegar a la central, ya que salen de granjas diferentes. Por otro lado, no basta con lograr el flujo de entrada al CAZ, sino que también se requiere operar con mínimos costos, tanto para cada granja como para el CAZ.

Desde el punto de vista de la automatización industrial y el control, este es un problema de coordinación, asignación de recursos y de planificación. De manera que deben analizarse los siguientes escenarios:

- Sin coordinación. Cada granja es una unidad independiente, la cual alquila sus cosechadoras y camiones, hasta un tope máximo, determinado por el flujo de caña que desee proporcionar, cada vez que haya madurado la caña.
- Coordinación ejercida desde el CAZ, se asignan cosechadoras y camiones para obtener una cadencia constante, cada vez que en una granja madura la caña. Esta coordinación funciona de la misma manera como el control centralizado actúa sobre un proceso determinado.
- Coordinación supervisada a partir de la interacción entre unidades de producción autónomas (denominadas *Holones* por algunos autores). Combinando enfoques de automatización basados en las teorías de control supervisorio, se propone en este artículo que dado un supervisor que tiene la imagen de todo el proceso (gemelo digital en otros contextos), asigne cosechadora y camión de acuerdo al potencial disponible y capacidades de transporte, previniendo asignaciones no deseadas. Las unidades independientes serían cada la granja,

el frente de corte, el transporte y la planta procesadora.

Dada la gran cantidad de variables que describen un modelo de asignación de recursos para la operación de un CAZ, lo que dificulta resolver el problema planteado analíticamente, se va a utilizar modelado y simulación, de manera que cada experimento de simulación refleje los escenarios planteados anteriormente, y ayude a construir un modelo de despacho óptimo que surta al CAZ con un flujo constante de insumos para su proceso.

Central Azucarero como un sistema de unidades autónomas

Una de las visiones de sistemas que permite representar sistemas complejos y les brinda capacidades de flexibilidad

y reconfiguración es la de los Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS), que considera cada elemento del sistema de producción como una unidad autónoma e independiente, denominada *Holón*. Esta visión establece que un sistema de producción se compone de tres tipos de holones básicos: Recurso, que maneja información pertinente a los recursos físicos, Producto, que maneja la especificación de cada producto que se puede obtener en un proceso de manufactura, y un Orden, que coordina el avance del proceso de producción y la logística. La representación general de los recursos de la Central Azucarera utilizando un diagrama de clases para implementar el gemelo digital del proceso tendría el aspecto de la figura 2.

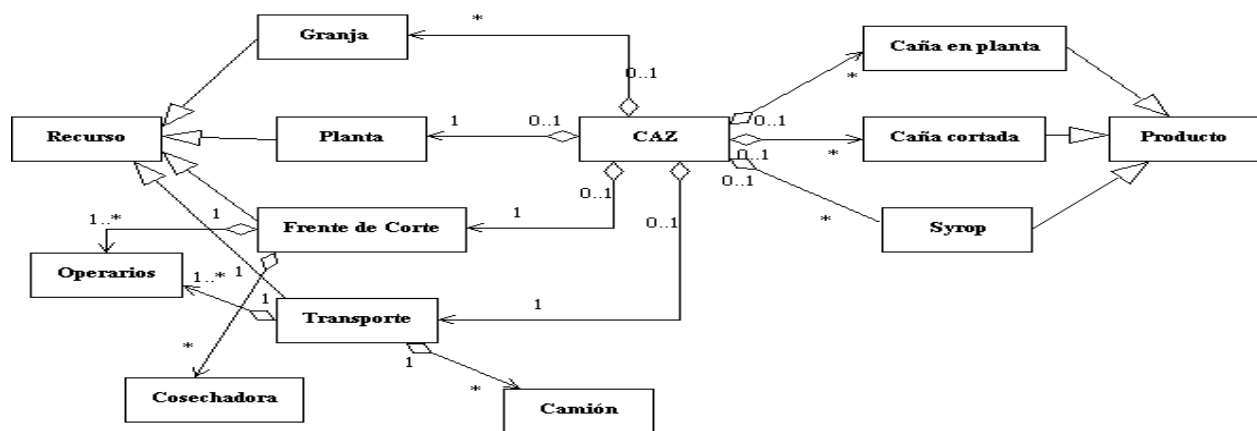


Figura 2. Arquitectura digital para modelar un CAZ como unidades de producción

Como se puede observar, en la gráfica se muestran los productos y recursos con que cuenta un CAZ. Los productos contienen aquellas especificaciones que pueden obtenerse en un CAZ, y los recursos son aquellos que se pueden utilizar para llevar a cabo una orden de producción con una especificación determinada. Los recursos con que cuenta un CAZ son de cuatro tipos: Granja, Frente de Corte, Planta y Transporte. La unidad Frente de Corte cuenta a su vez con uno o varios recursos como lo son cosechadoras y operarios. La unidad de Transporte tiene como recursos a los camiones y conductores. Los productos que maneja el CAZ son la caña cultivada, caña cortada y syrope, este último es un subproducto antes de obtener el azúcar. La asignación de los recursos para mantener al Holón Planta operando es una labor crítica, y en este artículo se busca proporcionar una solución basada en la simulación a eventos discretos

para que reciba un flujo de caña constante. Una propuesta para representar la dinámica de este sistema utilizando un método denominado redes de Petri es la de Chacón *et al.*, (2004). Dado que el CAZ se compone de muchos holones granja, corte, transporte, y estos a su vez manejan recursos y diversas etapas de producción, se requiere una representación simplificada, para evitar una red de Petri compleja. Una representación que extrae una estructura básica para este sistema se muestra en la figura 3, la cual representa el proceso de cosecha de caña y su transporte al CAZ. Esta estructura con etapas es válida para cada granja. Los recursos de cosechadora y camión, que son parte del frente de corte y transporte, se representan como marcaciones en los lugares que corresponden a la actividad de los recursos.

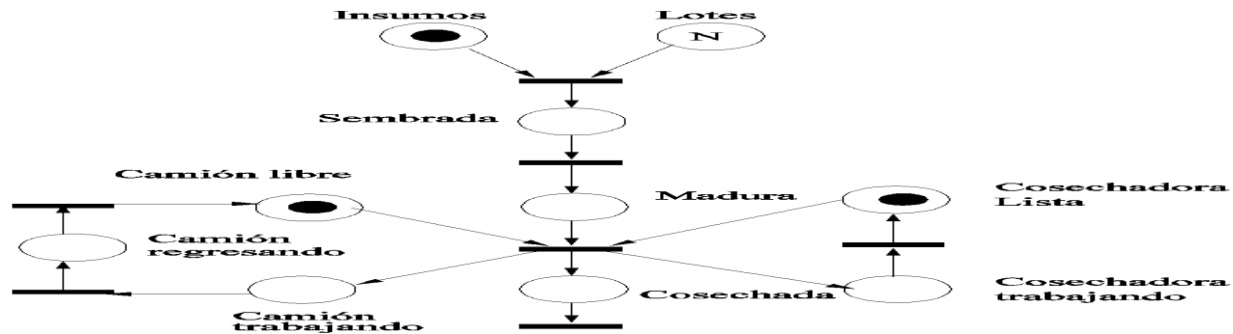


Figura 3. Dinámica del CAZ representada por una red de Petri

Para obtener la dinámica de un sistema de muchas granjas, cosechadoras y camiones, es necesario hacer una composición de muchas redes de Petri de este tipo, agregando la marcación correspondiente a cada recurso asignado a la finca, en particular a los lugares que corresponden al camión y a la cosechadora libre. Con el fin de llevar a cabo una asignación óptima se requiere de un mecanismo de supervisión para coordinar la dinámica del sistema completo, e ir asignando los recursos en la medida en que cada finca

los vaya requiriendo, puesto que cada una va a estar lista para cosecha en un tiempo diferente (Manco, *et al.*, 2024). Un enfoque para derivar supervisores se puede obtener de la teoría propuesta por Moody y luego por Liu (1998 ,2022) basado en redes de Petri y desigualdades lineales sobre los vectores de marcación. En el caso particular del modelo de aprovisionamiento del CAZ, la red de Petri que se obtiene es la de 28 elementos estructurantes como el de la figura 4.

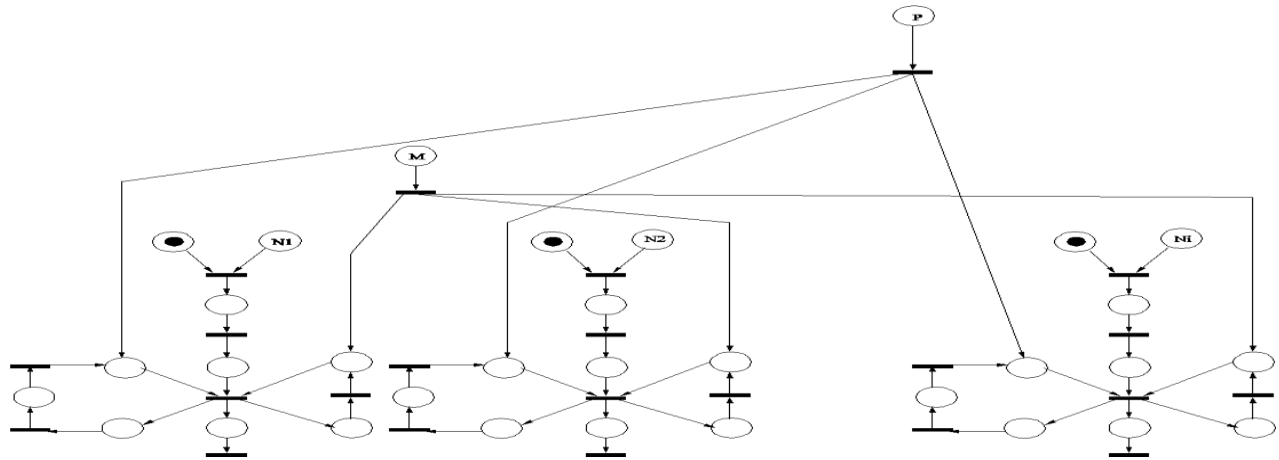


Figura 4. Red de Petri para representar varias granjas, asignación de cosechadoras y camiones.

Dado que son 28 fincas productoras las que se van a considerar, y el sistema supervisor consiste en un conjunto de lugares y transiciones adicionales cuya función es la de asignar marcación a los lugares que corresponden a la cosechadora y el recurso de transporte, con las restricciones de no asignar más de una cosechadora y dos camiones a cada finca, por ejemplo, y de no permitir marcaciones cuando se ha finalizado la etapa de cosecha en una finca en particular.

Simulación por eventos discretos

Para simular este sistema se escogió un simulador que implementa el formalismo de simulación de eventos discretos

DEVs propuesto por Zeigler, Muzy y Kofman (2018), el mecanismo de simulación de este simulador se basa en la interacción de procesos, según la definición de Guasch *et al.*, (2002). El lenguaje de simulación utilizado es Glider, el cual es un lenguaje orientado a la simulación mediante la construcción de una red de componentes. Para obtener estos componentes se utilizó la metodología de los autores para proyectar redes de Petri en redes de componentes que funcionan por eventos discretos según Parra y Chacón (2006).

La figura 5 muestra un esquema de componentes que modela el escenario de coordinación supervisada. La forma de cada componente indica la función

que realiza dentro del modelo, de acuerdo a la simbología del lenguaje de

simulación Glider, basada en el software de simulación Arena.

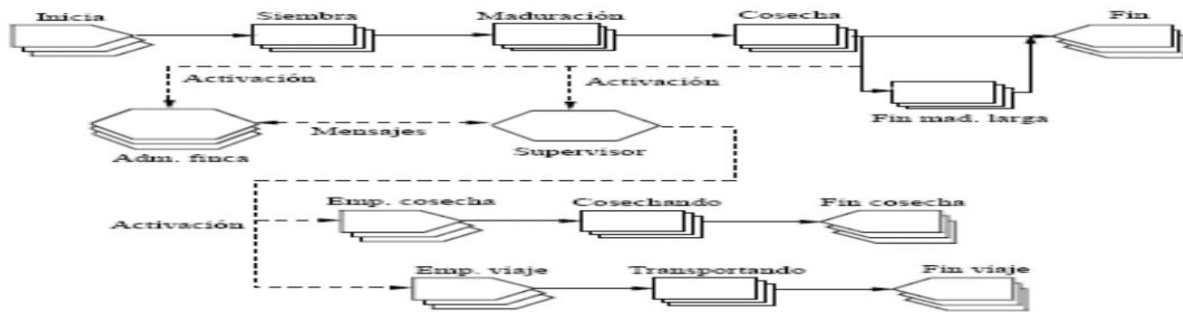


Figura 5. Red de componentes del simulador basado en eventos discretos

De esta manera, los rectángulos indican procesos que consumen recursos y tiempo, los polígonos que apuntan a la derecha indican generación de mensajes, los cuales circulan por toda la red, y los polígonos que apuntan a la izquierda indican disposición (desecho) de estos mensajes. La mayoría de los componentes tienen multiplicidad, puesto que representan varias fincas, varias cosechadoras y varios elementos de transporte. Los símbolos hexagonales representan los nodos autónomos de la administración de cada finca, así como el sistema de coordinación (uno solo). Lo que cambia entre un escenario y otro es la manera en que se conciben los componentes que administran cada finca y los que

llevan a cabo la coordinación. Por ejemplo, en la coordinación centralizada no existe multiplicidad en el componente administrador de finca, mientras que en el escenario descentralizado sin coordinación no habría componente supervisor. Los supuestos del modelo a considerar son iguales para todos los escenarios, y variará solamente la manera en que se asignan los recursos a las fincas.

La siguiente lista establece los supuestos iniciales basado en datos obtenidos en la bibliografía asociada a la explotación de caña proporcionado por:

- Total de fincas a sembrar: 28

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Extensión de las fincas: se distribuye uniformemente entre 100 y 500 hectáreas • Tiempo de siembra: 4 horas/hectárea • Maduración: seis meses luego de finalizar la siembra. (4320 horas) • Fin de disponibilidad: tres meses luego de madurar para la caña de corta maduración. (2160 horas) • Potencial de cosecha: 64 toneladas de caña/hectárea • Distancia a la central: uniformemente entre 20 y 200 kilómetros. • Tipo de caña: un 40% de la cosecha es caña de corta maduración, la caña de maduración tardía es el 60% restante. • Rendimiento de la cosechadora: 80 toneladas/hora | <ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento del camión: 40 toneladas/viaje • La cosechadora trabaja solamente si hay al menos un camión en espera • Costo del camión: viaje a U\$ 6/hora, alquiler a U\$ 5 por hora, desde el tiempo en que se reserva el recurso hasta que se libera. Costo de operación es de U\$ 15 por jornada de cosecha. Para cada escenario se realizaron ocho replicaciones, y se promediaron sus resultados para evitar sesgos. Se hizo traza de algunas variables con respecto al tiempo, tales como la cantidad de toneladas por cosechar, toneladas cosechadas, factor de utilización promedio de las cosechadoras y los camiones, entre otras variables. Estos resultados se detallan a continuación, de acuerdo a las variables analizadas. |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio sobre la simulación de la cadena de suministro en una Central Azucarera (CAZ) se enmarca dentro de una metodología de investigación cuantitativa basada en modelado y simulación computacional, lo que permite analizar dinámicas complejas

dentro del sistema productivo. Según Zeigler, Muzy y Kofman (2018), la simulación por eventos discretos En el presente estudio, se utiliza una metodología basada en herramientas avanzadas de modelado y simulación para abordar la compleja problemática

de la gestión de la cadena de suministro en las Centrales Azucareras (CAZ). Dado que la eficiencia operativa depende de la correcta coordinación de los recursos y las actividades dentro de la planta, se emplean técnicas como la simulación por eventos discretos (DEVS) y redes de Petri, que permiten modelar el comportamiento dinámico del sistema y evaluar distintas estrategias de asignación de recursos. Estas herramientas no solo facilitan la representación de procesos industriales en entornos controlados, sino que también proporcionan un marco para explorar alternativas de coordinación y supervisión en la gestión de los recursos, con el fin de optimizar la operación y reducir costos. Profundizado el tema (DEVS) es una metodología eficaz para representar procesos dinámicos en la industria, dado que modela la evolución del sistema mediante eventos secuenciales que reflejan la interacción entre las diferentes unidades de producción. En este contexto, la investigación utiliza redes de Petri, un formalismo matemático desarrollado por Chacón, Besembel y Henet (2004), que permite

modelar sistemas concurrentes y evaluar su comportamiento bajo distintos esquemas de planificación. Estos métodos proporcionan herramientas analíticas y experimentales para simular escenarios operativos y optimizar la asignación de recursos en la producción azucarera.

El enfoque de modelado aplicado en este estudio también está alineado con los principios de los Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS), una arquitectura de automatización que permite representar cada unidad del sistema productivo como un agente autónomo capaz de interactuar con otros elementos del proceso. Van Brussel *et al.*, (1998) proponen que los HMS mejoran la flexibilidad y adaptabilidad en entornos de producción mediante la descentralización de la toma de decisiones, un aspecto clave en la gestión de la cadena de suministro de los CAZ. En esta investigación, se aplican modelos supervisados y descentralizados para evaluar cómo la coordinación de recursos impacta la eficiencia operativa del sistema. El uso de simulación permite no solo evaluar la

viabilidad de estos enfoques, sino también cuantificar los costos asociados a cada estrategia, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones gerenciales. Desde una perspectiva metodológica, el estudio se inscribe dentro del paradigma de la investigación aplicada, ya que busca resolver un problema concreto en la industria azucarera mediante el uso de herramientas científicas y tecnológicas. Según Guasch, Piera, Casanovas y Figueras (2005), la simulación es una técnica poderosa para analizar sistemas logísticos y de manufactura, ya que

permite experimentar con diferentes configuraciones sin afectar las operaciones reales. Este enfoque experimental, combinado con análisis cuantitativo, facilita la identificación de estrategias óptimas para minimizar costos y garantizar un flujo continuo de insumos en la planta procesadora. En este sentido, la metodología utilizada en la investigación no solo contribuye al avance del conocimiento en el área de la automatización industrial, sino que también ofrece soluciones prácticas para mejorar la eficiencia en la producción de azúcar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados obtenidos en la simulación de la cadena de suministro de una Central Azucarera (CAZ) proporciona una visión integral sobre la dinámica operativa del sistema y la eficiencia de distintos enfoques de planificación y coordinación logística. La simulación por eventos discretos aplicada en este estudio permitió evaluar el comportamiento del sistema bajo tres escenarios clave: sin coordinación, coordinación centralizada y coordinación descentralizada

supervisada. Cada uno de estos modelos refleja diferentes estrategias de asignación de recursos, lo que permite identificar fortalezas y debilidades en la operación de la cadena de suministro de caña de azúcar.

Los resultados obtenidos a partir de los experimentos simulados proporcionan datos cuantitativos sobre variables críticas como la capacidad de cosecha y transporte, la eficiencia del uso de recursos, la estabilidad del flujo de

insumos hacia la planta procesadora y los costos operacionales asociados a cada modelo de gestión. La comparación de estos indicadores permite determinar cuál de las estrategias analizadas ofrece un mejor desempeño en términos de continuidad de operación, reducción de costos y optimización del tiempo de cosecha y transporte. De esta manera, se busca proporcionar información relevante para la toma de decisiones en la industria azucarera, permitiendo a los gestores evaluar la viabilidad de implementar modelos de coordinación más eficientes.

En este contexto, la interpretación de los resultados se orienta a destacar la influencia de la planificación logística en la estabilidad operativa de un CAZ, resaltando cómo la gestión de la cosecha y el transporte incide en la producción continua de azúcar. Asimismo, se analiza el impacto de la asignación de recursos en la eficiencia del sistema, comparando los beneficios y limitaciones de los enfoques de coordinación utilizados. A partir de estos hallazgos, se plantean recomendaciones para optimizar la

logística de aprovisionamiento y mejorar la competitividad del sector azucarero mediante la implementación de modelos avanzados de supervisión y gestión de recursos.

Potenciales de producción en fincas de caña

El potencial productor de las fincas de caña que pueden producir en un momento dado es válido para los tres escenarios, el resultado se mide en la cantidad de toneladas de caña que están en condiciones de cosecharse, a medida que las fincas cultivadas van madurando. La figura 6 muestra la cantidad promedio de toneladas de caña madura que se podrían cosechar, y se comporta igual para todos los escenarios considerados. Como puede observarse, al inicio no todas las fincas están disponibles a la vez; solamente en un período breve de 50 días todas las fincas están disponibles para cosechar, de ahí la baja cantidad de toneladas de caña disponibles al inicio. Las fincas dejan de estar disponibles cuando la caña de maduración temprana se inunda, o cuando se agota la caña debido a la cosecha.



Figura 6. Cantidades de caña disponibles para cosechar, promedio de 8 simulaciones

Capacidades de cosecha y transporte. Otro resultado a analizar es el de los potenciales de capacidad de cosecha y transporte, los cuales se muestran a continuación con gráficas comparativas que incluyen todos los escenarios. El comportamiento simulado del potencial de cosecha se muestra en la figura 7, para los escenarios sin coordinación, coordinación centralizada y distribuida. Para todos los escenarios la capacidad de cosecha nominal máxima es de 800 ton/hora, y las cosechadoras deben contar con el camión transportador al lado para poder ejecutar su trabajo y en ocasiones estos estarán realizando viajes hasta el Central Azucarero, por tal motivo esta capacidad de cosecha disminuirá cuando las cosechadoras estén

asignadas a una finca en particular, ya que dejarán de estar disponibles para efectuar labores de cosecha. Así mismo, la capacidad de cosecha por asignar aumentará cuando las granjas se vayan agotando, ya que así se liberan. Para el caso de coordinación descentralizada, la capacidad de cosecha es mayor al inicio de la simulación, y en la medida en que va madurando la caña en las fincas esta capacidad de cosecha se disminuye, ya que se han asignado cosechadoras a cada una de las granjas. A partir de las 6500 horas, toda la capacidad está asignada, presentándose fluctuaciones solamente cuando una finca se agota y libera la cosechadora, pudiendo esta ser asignada a otra granja. En el escenario sin coordinación, la capacidad de cosecha fluctúa mucho al inicio debido a

que las fincas de maduración temprana toman para sí la mayor cantidad de cosechadoras posible, ya que deben

enviar a la planta un flujo de 300 ton/hora.

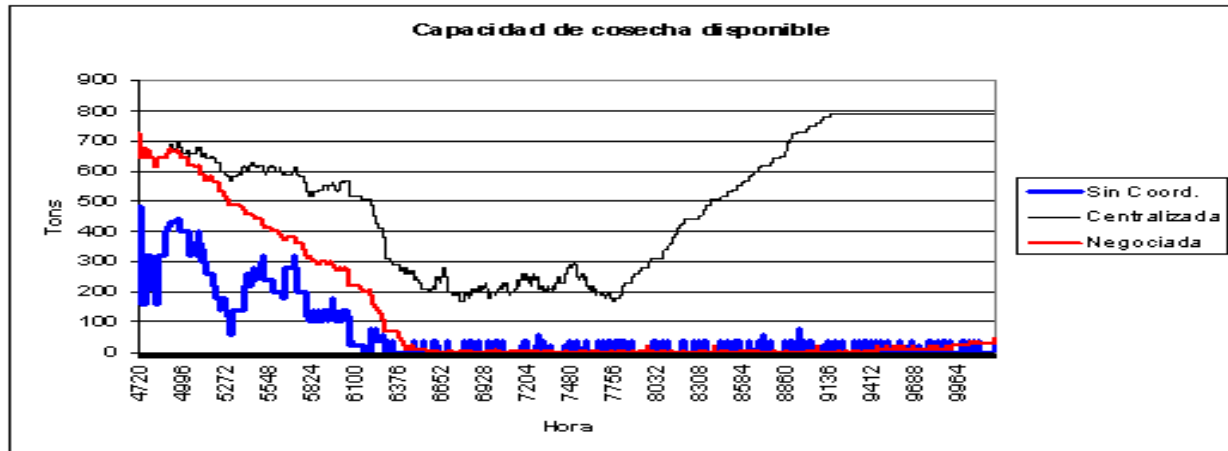


Figura 7. Evolución de la cantidad de caña cosechada disponible para cada uno de los tres escenarios de simulación propuestos

En el caso del comportamiento centralizado, se puede apreciar que es distinto con respecto a los otros escenarios, puesto que no se utiliza la capacidad instalada en su totalidad al inicio, ya que no todas las fincas han madurado su caña. Esa capacidad de cosecha empieza a disminuir gradualmente, en la medida en que son asignadas cosechadoras a cada una de las fincas productoras.

Igual análisis de resultados se lleva a cabo para la capacidad de transporte. La cantidad de camiones ideal para una granja depende de las cosechadoras

asignadas, ya que para mantener una cadencia de trabajo se requiere que haya entre dos y tres camiones por cosechadora asignada, puesto que así permitirá que esta última trabaje, mientras los camiones van y regresan de la central. Por otro lado, asignar más de un camión a una cosechadora trae costos por espera ociosa, debido a que solamente un camión podrá cargar lo que arroja la cosechadora. Los demás camiones asignados deben esperar. Este costo de espera ociosa puede compensar el costo que implica traer un camión desde el CAZ o desde otra

granja, cada vez que la cosechadora finalice un trabajo. El comportamiento de la capacidad de transporte puede apreciar en la figura 8. Este

comportamiento varía entre un escenario a otro, puesto que cambia la manera en que se asigna transporte a cada una de las granjas.

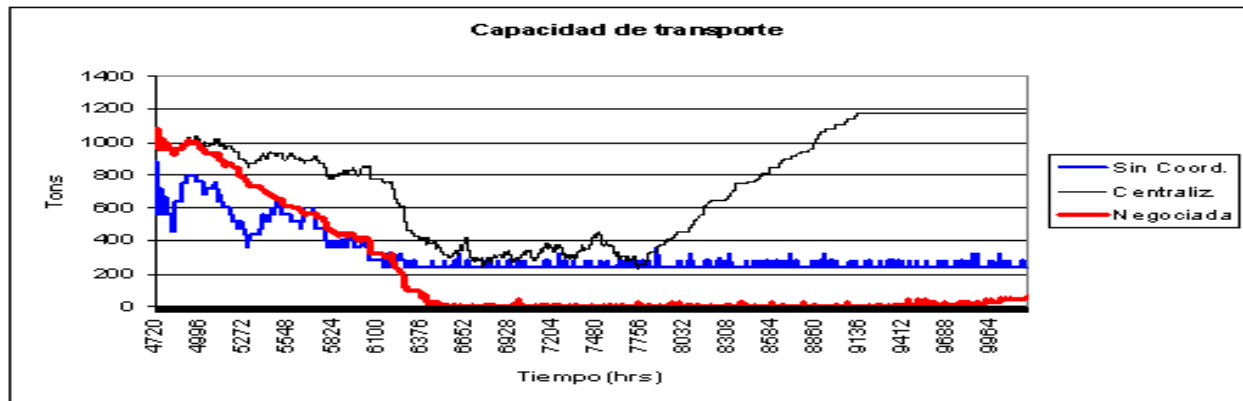


Figura 8. Evolución de la capacidad de transporte en el tiempo. Promedio de las simulaciones para los tres escenarios.

Considerando el escenario donde no hay coordinación, sus resultados muestran grandes oscilaciones al inicio, debido a que una finca que termina su etapa de maduración trata de obtener para sí la mayor cantidad posible de recursos de transporte para cumplir con su tasa de producción, asignándose estos rápidamente a las fincas de maduración temprana. Luego se estabiliza ya que algunos camiones van a permanecer sin asignar durante el resto de la simulación. El potencial de transporte bajo el escenario de planificación central es más alto al

principio, puesto que no se asigna toda la capacidad a las fincas de maduración temprana, estabilizándose posteriormente. El potencial de transporte en el escenario de holones cooperando inicialmente es alto, ya que no se asigna toda la capacidad desde un comienzo, pero a medida que las granjas van madurando, empieza a trabajar con la capacidad plena. De hecho, es el único escenario donde trabaja a plena capacidad la capacidad de transporte durante un período de 2000 horas, proporcionada por el holón de transporte.

Tasas de cosecha diaria. La cosecha diaria de caña depende del escenario considerado. La figura 9 contiene el comparativo de los tres escenarios. El escenario que corresponde a la ausencia de coordinación tiene un comportamiento muy oscilante al principio debido a que no todas las fincas están disponibles, fluctuando la tasa de cosecha entre 500 y 1800 ton/día. Por lo tanto, empieza con oscilaciones hasta que luego se estabiliza cuando las fincas están en el potencial máximo, alrededor de 1950 ton/día. Las fluctuaciones se deben a que no todas las cosechadoras trabajarán las 24 horas, debido a que deben esperar que el transporte asignado lleve la caña a la central y regresen. Como son treinta camiones desplazándose desde cada granja a la central azucarera en todo momento, es difícil predecir la cosecha diaria a menos que se promedien varias simulaciones.

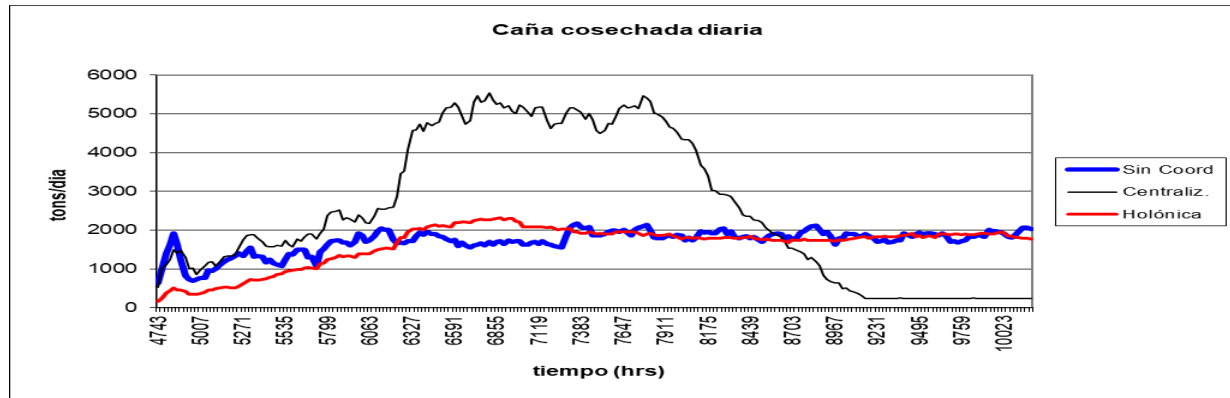


Figura 9. Promedio de caña cosechada por día, para ocho simulaciones.

En el escenario de coordinación central, la cantidad cosechada inicialmente es baja, debido a que no se asigna toda la capacidad de cosecha cuando empiezan a madurar las fincas de caña. Posteriormente y cuando se utiliza en su potencial pleno las cosechadoras y el transporte, la cadencia de cosecha se estabiliza cerca de las 5000 ton/día, que es el valor que más se aproxima a la capacidad de proceso de la planta. Posteriormente esta cantidad disminuye debido a que algunas fincas pasan a inactividad o dejan de estar disponibles.

Bajo el escenario de coordinación distribuida, se tiene que el comportamiento de la tasa de cosecha inicia con la cantidad cosechada baja, debido a que no todas las fincas están produciendo. Pero a medida que

progresla simulación esta cantidad se estabiliza en 2000 ton/día hasta el final de simulación. Este escenario es el que presenta una menor variabilidad cuando se estabiliza la producción de caña, ya que utiliza de manera más racional los recursos de cosecha y transporte.

Costos de operación. Otra de las maneras de evaluar el comportamiento simulado de los diferentes enfoques para llevar a cabo la logística de aprovisionamiento para un Central Azucarero consiste en analizar resultados de costos de operación. Para el modelo se consideraron diversos costos, como el costo de transportar, el costo de funcionamiento de cada una de las cosechadoras, costo de funcionamiento de la planta, costo de las granjas para utilizar los elementos

de cosecha y transporte, entre otros. La tabla 1 muestra como es el costo acumulado para utilizar recursos de transporte y cosecha, consolidado para todas las granjas.

Como puede observarse, en el escenario que corresponde a la coordinación holónica se observa el menor costo acumulado para las granjas, arrojando un total de U\$ 26059

dólares en promedio para cada granja, luego de ocho simulaciones.

Tabla 1. Costo promedio simulado para cada escenario

Indicador/escenario	Sin coordinar	Centralizado	Descentralizado
Promedio	975802.5	3097657.75	729626.875
Promedio por granja	34850.089	110630.634	26058.103

CONCLUSIONES

Esta investigación ha elaborado un análisis completo en relación al impacto que tiene la planeación y la coordinación de recursos por la eficiencia operacional de los sistemas de abastecimiento en una Central Azucarera (CAZ). Los resultados derivados de la simulación por eventos discretos corroboraron que un modelo de coordinación descentralizada supervisada produce efectos benéficos sobre la estabilidad del flujo de insumos hacia la planta al disminuir los “bottlenecks” en la producción y mejorar la utilización de los recursos. A su vez, se demostró que una subóptima estrategia de asignación puede originar variabilidad en el

aprovechamiento de la capacidad de los camiones asociados a las cosechadoras, deteriorando la rentabilidad y la sostenibilidad del sistema productivo.

Como se indicó, el control supervisorio por redes de Petri es efectivo a la hora de tomar decisiones sobre las asignaciones de los camiones hacia los sectores de la cosechadora, sobre todo en lo que respecta a anticipar escenarios de pérdidas y optimizar el gasto en operaciones. Así, se debe hacer uso de estas alternativas de modelamiento, como la simulación por eventos discretos en el campo industrial azucarero, para el análisis de sistemas

utilizando el enfoque logístico teniendo en cuenta los impactos en la cadena de suministro. La investigación también enfatiza que el enfoque de Manufactura Holónica, más allá de su uso como una arquitectura de automatización, puede aplicarse a la logística de la cadena de suministro en entornos industriales como la CAZ. Además, la simulación basada en DEVS demostró ser una herramienta efectiva para modelar procesos industriales completos al restringir recursos y etapas del proceso a un solo modelo que integra redes de Petri y procesos estocásticos reflejando

características críticas de la logística de la cadena de suministro.

Como punto final, para otros trabajos, se sugiere incluir agentes inteligentes en la simulación para aumentar la autonomía de los holones en el sistema de producción y habilitar capacidades de negociación entre los diferentes constituyentes del proceso. Tal desarrollo mejoraría la flexibilidad de los sistemas de gestión en la industria azucarera, aumentando así la competitividad y sostenibilidad del sector.

REFERENCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

Acebes, A., García, J., & Sánchez, P. (2004). Diseño de un entorno de modelado inteligente combinando sistemas de eventos discretos y continuos. *Revista Internacional de Modelado y Simulación*, 12(3), 45-59.
<https://doi.org/10.1016/j.ijms.2004.03.010>

Caballero Pérez, L. A. Hernández Monzón, A. Tejedor Arias, R. y Montes Montes, E. J. Caracterización de mezclas de materiales poliméricos naturales para encapsulación, mediante secado por aspersión, RCTA, vol. 1, n.º 41, pp. 1–11,

may 2023.
<https://doi.org/10.24054/rcta.v1i41.2412>.

Calsada Uribe Nataly Jullyet.; Caballero Pérez Luz Alba; Soto Tolosa Erika Paola. (2022). Elaboración de una barra proteica con recubrimiento de un gel energético a base de café. *Revista @limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*. ISSN Impreso 1692-7125 ISSN Electrónico 2711-3035. Volumen 20 N° 2. Pp: 5 - 23.
<https://doi.org/10.24054/limentech.v20i2.2282>.

- Chacón, E., Besembel, I., & Hennet, J. (2004). Coordination and optimisation in oil and gas production complexes. *Computers in Industry*, 53(1), 17–37.
- Guasch, A., Piera, M., Casanovas, J., & Figueras, J. (2005). Modelado y Simulación: Aplicación a procesos logísticos, fabricación y servicios. Editorial Alfaomega.
- Hsieh, J. (2004). Modelado y control de un sistema de manufactura holónica utilizando el protocolo de negociación multi-agente Contract Net. *Journal of Manufacturing Systems*, 23(4), 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2004.07.007>
- Jiménez, J., Martínez, F., & Torres, M. (2005). Enfoque de redes de Petri continuas para modelar y simular sistemas logísticos y de producción. *Revista de Sistemas Logísticos*, 21(2), 133-142. <https://doi.org/10.1016/j.rsl.2005.04.015>
- Manco Jaraba, D. C., Navarro Becerra, Y., Rojas Martínez., E. E., & Mindiola Gil, R. D. (2024). Cañaverales's Spring: A Novel Strategy For Socio-Economic Development In The South Of La Guajira (Colombia) Through Geoeducation, Geotourism And Geoconservation. *REVISTA AMBIENTAL AGUA, AIRE Y SUELO*, 13(1), 33–44. <https://doi.org/10.24054/raaas.v13i1.2718>
- Parra, L., & Chacón, R. (2006). Evaluación de desempeño de sistemas modelados con redes de Petri utilizando simulación DEVS. *Simulación en la Industria*, 34(2), 77-92. <https://doi.org/10.1016/j.simindustria.2006.03.005>
- Procaña. (2024). Mercado mundial del azúcar: ¿Qué traerá el 2024? Recuperado de <https://procana.org/site/mercado-mundial-del-azucar-que-traera-el-2024/>
- Valor y Dinero. (2024, 8 de julio). Evolución del mercado azucarero en Colombia: impactos y perspectivas para 2024. Recuperado de <https://valorydinero.com/2024/07/08/evolucion-del-mercado-azucarero-en-colombia-impactos-y-perspectivas-para-2024/>
- Van Brussel, H., Wyns, J., Valckenaers, P., Bongaerts, L., & Peeters, P. (1998). Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in Industry*, 37(3), 255–274.
- Zeigler, B., Muzy, H., & Kofman, E. (2018). Theory of Modelling and Simulation: Discrete Events and System Computational Foundations. Academic Press.

- Acebes, L. Alves, R. Merino, A. and De Prada C. Un entorno de modelado inteligente y simulación distribuida de plantas de proceso. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial., 1:42–58, 2004.
- Aguilar N. Reconversión de la cadena agroindustrial de la caña de azúcar en Veracruz México. Nova Scientia. V6 N12 pp 125-161. 2014.
- Chacón, E. Besembel I., and Hennet J. Coordination and optimisation in oil and gas production complexes. Computers in Industry, 53:17–37, 2004.
- Engormix. Cosechadoras de caña de azúcar case ih. cosechadoras serie a.<http://www.engormix.com/cosechadoras/anaazucar/cases/articulos/1144AGR.htm>, 2006.
- García M Javier M. (2018). Perspectiva competitiva en el mercado de galletas cómo referencia para la inversión en el sector de alimentos en Colombia. Revista @limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria. Vol. 16 (2). p: 83 - 95.
- Guasch, A. Piera M., Casanovas J., and Figueras J. Modelado y Simulación. Aplicación a procesos logísticos, fabricación y servicios. Editorial Alfaomega, 2005.
- Hsieh F. Model and control holonic manufacturing systems based on fusion of contract nets and petri nets. Automática., 40:51–57, 2004.
- IEAC-CESIMO. Glider, reference manual. Universidad de Los Andes. Reporte Técnico, 1996.
- Jiménez, E., Pérez, M., & Sanz, F. (2010). Modelado y simulación de sistemas logísticos y de producción mediante Redes de Petri. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 2(4), 39-53.
- Liu G. y Petri Nets. Theoretical models and analysis methods for concurrent systems. ISB 978 -981-19- 6309-4. Springer Verlag, p. 201. 2022. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-6309-4>.
- Moody, J. and Antsaklis, P. Supervisory Control of Discrete Event Systems using Petri nets. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- Parra C. y Chacón E. Evaluación del desempeño de procesos de manufactura proyectando redes de Petri hacia redes de

- eventos discretos. In XII Latin-American Congress in Automatic Control, 2006.
- Porter M. E. Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. New York, Free Press, 1985.
- Sánchez C., Mónica Alejandra y Caballero P. Luz Alba. (2019). Uso de cristales de aloe vera (*aloe barbadensis miller*) en la elaboración de un relleno líquido para bombón de chocolate. Revista @limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria. ISSN 1692-7125. Volumen 17 N° 1. Pp: 80 - 93. DOI: <https://doi.org/10.24054/limentech.v17i1.331>
- Sánchez Castillo, V. (2024). Conservación del agua y las tecnologías sostenibles: estudios sobre las tecnologías y prácticas emergentes para el desarrollo sostenible y la conservación de ecosistemas. *REVISTA AMBIENTAL AGUA, AIRE Y SUELO*, 15(2), 1–15. <https://doi.org/10.24054/raaas.v15i2.3109>
- Van Brussel H., Wyns, P. J. Valckenaers, Bongaerts L., and Peeters P. Reference architecture for holonic manufacturing systems: Prosa. Computers in Industry, 1998.
- Zeigler, B. Muzy, H. and Kofman E. Theory of Modelling and Simulation. Discrete events and system computational foundations. Academic Press, 2018.
- Zérega, L. Hernández, T. and Valladares J. Evaluación de 14 variedades de caña de azúcar en dos suelos afectados por sales bajo condiciones de umbraculo. Caña de azúcar, 9:81–98, 1991.