

Planificación de la Gestión Energética industrial basada en pronóstico de confiabilidad en la generación, en un contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*

Industrial Energy Management Planning based on reliability forecasting in generation, in a context of the Sustainable Development Goals

Recibido: Noviembre 27 de 2024 - Evaluado: Febrero 28 de 2025 - Aceptado: Mayo 29 de 2025

Carlos Arturo Parra-Ortega**
Universidad de Pamplona, Colombia
carapa@unipamplona.edu.co
<https://orcid.org/0000-0003-3593-9504>

Javier Mauricio García-Mogollón***
Universidad de Pamplona, Colombia
jmgmogollon@unipamplona.edu.co
<https://orcid.org/0000-0001-7423-8909>

Aldo Pardo-García****
Universidad de Pamplona, Colombia
apardo13@unipamplona.edu.co
<https://orcid.org/0000-0003-2040-9420>

Para citar este artículo / To cite this Article

Parra-Ortega, C. A., García-Mogollón, J. M., & Pardo-García, A., (2025). Planificación de la Gestión Energética industrial basada en pronóstico de confiabilidad en la generación, en un contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. *Revista Gestión y Desarrollo Libre*, 10(20), 1-15. https://doi.org/10.18041/2539-3669/gestion_libre.20.2025.13589

Editor: Dr. Rolando Eslava-Zapata

Resumen

Introducción: la gestión energética en entornos industriales es un desafío estratégico, especialmente en sectores como la refinación de petróleo y la producción de crudo, donde la autogeneración de energía permite reducir costos y garantizar la operatividad. Sin embargo, la confiabilidad en la generación no es absoluta, ya que la ocurrencia de fallos obliga a complementar la demanda con compras al Sistema Interconectado Nacional, generalmente a un costo superior. La incertidumbre en la frecuencia y duración de estos fallos dificulta la planificación de compras de energía, lo que puede derivar en sobrecostos o déficits operacionales.

* Artículo Original. Artículo de investigación e innovación. Artículo de investigación. Proyecto de investigación vinculado a la Universidad de Pamplona de Colombia.

** Doctor en Ciencia Aplicadas por la Universidad de Los Andes, Venezuela. Profesor en la Universidad de Pamplona, Colombia.

*** Doctor en Ciencias Gerenciales Universidad URBE, Venezuela. Profesor en la Universidad de Pamplona, Colombia.

**** Doctor en Ciencia Técnicas por la Universidad Nacional Técnica de Belarus, Bielorrusia. Profesor en la Universidad de Pamplona, Colombia.

Objetivo: este estudio propone un modelo predictivo basado en Dinámica de Sistemas para mejorar la planificación energética, optimizando la confiabilidad de la generación y la gestión de costos.

Método: Mediante la simulación de diferentes escenarios, se anticipa la necesidad de compra de energía, permitiendo decisiones más eficientes y alineadas con la sostenibilidad operativa. La investigación se enmarca en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (Energía asequible y no contaminante), 9 (Industria, innovación e infraestructura) y 12 (Producción y consumo responsables), promoviendo estrategias de gestión energética más resilientes y sostenibles.

Resultado: la modelación del sistema identifica los desafíos asociados a la confiabilidad del suministro eléctrico en un complejo de producción de petróleo crudo, destacando la necesidad de estrategias que garanticen la eficiencia energética y la sostenibilidad económica.

Conclusión: los resultados destacan la importancia de un enfoque sistémico para la gestión energética en entornos industriales, particularmente en el sector de producción de petróleo crudo. A través de la modelación con Dinámica de Sistemas, se identifican las principales variables que afectan el desempeño energético del complejo analizado, lo que permite evaluar el impacto de diferentes estrategias en la eficiencia operativa y financiera.

Palabras clave: Gestión Energética, Dinámica de Sistemas, Confiabilidad en la Generación, Planificación Industrial

Abstract

Introduction: Energy management in industrial environments is a strategic challenge, especially in sectors such as oil refining and crude oil production, where self-generation of energy allows for cost reduction and ensures operational continuity. However, generation reliability is not absolute, as the occurrence of failures necessitates supplementing demand with purchases from the National Interconnected System, generally at a higher cost. Uncertainty regarding the frequency and duration of these failures complicates energy procurement planning, which can lead to cost overruns or operational deficits.

Objective: This study proposes a predictive model based on System Dynamics to improve energy planning, optimizing generation reliability and cost management.

Method: Through the simulation of different scenarios, the need for energy purchases is anticipated, enabling more efficient decisions aligned with operational sustainability. This research aligns with Sustainable Development Goals 7 (Affordable and Clean Energy), 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), and 12 (Responsible Consumption and Production), promoting more resilient and sustainable energy management strategies.

Results: System modeling identifies the challenges associated with the reliability of the electricity supply in a crude oil production complex, highlighting the need for strategies that guarantee energy efficiency and economic sustainability.

Conclusion: The results underscore the importance of a systemic approach to energy management in industrial environments, particularly in the crude oil production sector. Through System Dynamics modeling, the main variables affecting the energy performance of the analyzed complex are identified, allowing for the evaluation of the impact of different strategies on operational and financial efficiency.

Keywords: Energy Management, System Dynamics, Generation Reliability, Industrial Planning

Introducción

El crecimiento industrial y el aumento de la demanda energética han impulsado la necesidad de desarrollar modelos de gestión de energía eficientes y confiables. En sectores como la refinación de petróleo y la producción de crudo, contar con una generación propia de energía

permite a las empresas operar con mayor estabilidad y controlar los costos de producción. Sin embargo, la confiabilidad en la generación de energía no siempre está garantizada, pues fallos inesperados pueden generar interrupciones en el suministro, obligando a las organizaciones a recurrir a compras de energía en el mercado a tarifas más elevadas.

La incertidumbre en la demanda energética y la variabilidad en la disponibilidad de generación representan retos significativos para la planificación y gestión del recurso energético. En este contexto, se requiere la implementación de herramientas que permitan predecir con mayor certeza los requerimientos energéticos y establecer estrategias de compra eficientes. En este sentido, la Dinámica de Sistemas emerge como una metodología idónea para modelar la interacción de las distintas variables del sistema eléctrico y su impacto en la gestión financiera y operativa.

En ciertas ocasiones la generación de energía permite satisfacer demandas a nivel industrial, para organizaciones que pertenecen al campo de la energía y la industria como lo es la refinación de petróleo y la producción de crudo. La principal ventaja es la de generar su propia energía con un esquema de costos controlable para mantener en funcionamiento las plantas instaladas, así como satisfacer la demanda de uso de equipos de oficina, iluminación, maquinaria entre otros aspectos. Sin embargo, la confiabilidad de una planta de este tipo no es completa debido a la ocurrencia de fallos en la generación, y durante estos eventos de fallo y reparación se hace necesario comprar energía del sistema interconectado nacional para mantenerse funcionando, solo que en esta ocasión a un costo mayor.

Anticipar una compra de energía es una labor que no es fácil, dado que es complicado prever el comportamiento de la demanda en un período determinado cuando el consumo presenta variaciones diarias. Debido a lo anterior, se propone el uso de metodologías basadas en pronósticos (*forecasting*) y en sistemas realimentados para ciclos de control (Dinámica de Sistemas) para elaborar un presupuesto de compra de energía en función de la disponibilidad de generación y la demanda cambiante, que ayuden a una mejor planificación. En momentos de falla en la disponibilidad, hay que hacer una compra externa a un precio mayor del kWh, y si se hace un presupuesto anualizado, se corre el riesgo de quedar en default o de no poder adquirir la energía si los eventos de falla en generación se prolongan en el tiempo.

La falta de una planificación adecuada basada en herramientas de predicción y análisis puede derivar en ineficiencias operativas y dificultades en la asignación de presupuestos. El problema radica en la dificultad de anticipar con precisión las fluctuaciones en la generación y el consumo de energía, lo que impide la optimización de recursos y la toma de decisiones informadas sobre la compra de energía externa. La falta de metodologías que integren la Dinámica de Sistemas como herramienta de modelado y simulación limita la capacidad de las empresas para gestionar de manera efectiva su demanda energética y minimizar los impactos financieros asociados a las fallas en la generación.

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar un modelo basado en Dinámica de Sistemas que permita evaluar el comportamiento del sistema energético y generar estrategias de compra eficientes. Este enfoque contribuirá a la toma de decisiones estratégicas para optimizar la gestión energética y mejorar la sostenibilidad de las operaciones industriales. ¿Cómo puede un modelo basado en Dinámica de Sistemas mejorar la confiabilidad de la gestión energética y optimizar la toma de decisiones en la compra de energía externa en el sector industrial?

El presente estudio propone un modelo basado en Dinámica de Sistemas para la gestión de energía en el sector industrial, con énfasis en la confiabilidad de la generación propia y su relación con la compra de energía externa. Este enfoque permite evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios de generación y consumo, facilitando la toma de decisiones estratégicas para optimizar costos y garantizar la continuidad operativa. Además, el

estudio se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), abordando la eficiencia energética y la sostenibilidad como principios fundamentales para la gestión industrial.

Metodología

La presente investigación adoptó un enfoque cuantitativo con un diseño exploratorio y descriptivo, fundamentado en la metodología de modelado dinámico mediante Dinámica de Sistemas. De acuerdo con Sterman (2000) la Dinámica de Sistemas permite la representación de estructuras complejas a través de modelos de retroalimentación, facilitando el análisis de escenarios y la toma de decisiones en sistemas industriales y energéticos. Esta metodología se aplica para modelar la gestión energética en un entorno industrial sujeto a variaciones en la confiabilidad de generación y la compra de energía externa. El estudio siguió las siguientes fases metodológicas:

- Delimitación del sistema: se definió el sistema energético de una planta industrial que combina generación propia y compra de energía al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Se identificaron las variables clave que afectan el consumo, la disponibilidad de generación y los costos asociados.
- Construcción del modelo causal: se elaboró un diagrama causal que representa la interrelación entre las variables del sistema, como la demanda de energía, la disponibilidad de generación y los costos de compra externa. Este paso se fundamentó en la metodología de Dinámica de Sistemas según las pautas establecidas por Sterman (2000).
- Construcción del modelo estructural: una vez identificado los ciclos causales, se aplica la simbología propuesta por Forrester, siguiendo lineamientos de flujos de material e información. Lo anterior permite obtener sistemas de ecuaciones diferenciales que se pueden implementar en un simulador, de acuerdo a pautas de Aracil (1997) y De-Leo *et al.* (2020).
- Desarrollo del modelo de simulación: se implementó un modelo cuantitativo basado en ecuaciones diferenciales y algebraicas, utilizando *software* de simulación como *Vensim*, *Evolución*, *Stella*, o *I-think*, entre otros. El modelo permitió analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios de confiabilidad y variabilidad en el consumo de energía.
- Validación del modelo: se realizaron pruebas de validación mediante técnicas como la comparación de datos históricos y la verificación estructural del modelo. Según Barlas (1996), la validación en Dinámica de Sistemas debe considerar la congruencia entre el modelo y la realidad empírica, así como su capacidad predictiva.
- Análisis de escenarios y formulación de estrategias: se simuló distintos escenarios para evaluar el impacto de cambios en la confiabilidad de generación y en las tarifas energéticas. Los resultados obtenidos se interpretaron para proponer estrategias de optimización de la gestión energética.

El enfoque metodológico basado en Dinámica de Sistemas permitió comprender la dinámica del sistema de gestión energética y anticipar los efectos de diferentes políticas de compra y generación. Finalmente, los resultados obtenidos permitirán formular recomendaciones para la mejora de la confiabilidad y eficiencia energética en el sector industrial.

Resultados

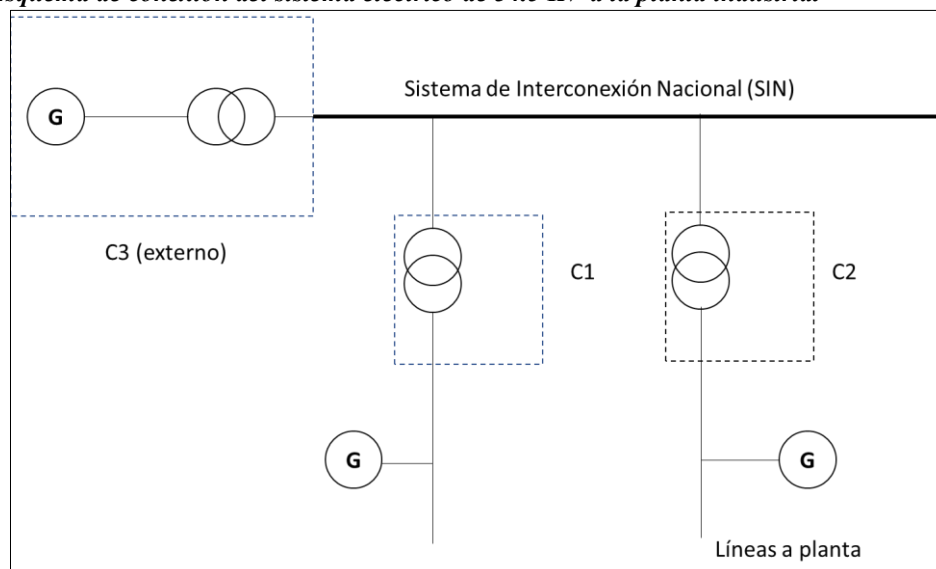
Descripción del sistema físico

El análisis del sistema energético bajo estudio permitió identificar patrones de consumo, costos asociados y dinámicas de realimentación en la gestión del suministro eléctrico. La modelación basada en Dinámica de Sistemas facilitó la representación estructural y causal del comportamiento energético en un complejo de producción de petróleo crudo, destacando la interacción entre los subsistemas de consumo, tarifas y gastos. A partir de la simulación de escenarios, se evidenció la necesidad de ajustes presupuestales para garantizar la sostenibilidad financiera del sistema, dadas las fluctuaciones en la disponibilidad de energía y la variabilidad tarifaria.

Para poder desarrollar un modelo de pronóstico y de esta forma determinar el impacto económico del consumo de energía de una zona con sistema propio de generación, se requirió primero de una delimitación del sistema, para luego definir los elementos más relevantes y las estructuras de realimentación subyacentes. Como metodología se establecieron parámetros estandarizados por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME, 2017), al igual que pronósticos de fallos en confiabilidad (Kelton *et al.*, 2010). Para ello se supuso que existía un complejo de producción de petróleo crudo, cuyas máquinas y dispositivos operaban dentro de los circuitos C1, C2 y C3, cada uno con un consumo diario sujeto a variaciones. Las tarifas de operación eran diferentes, ya que la energía es generada inicialmente, y se compra en caso de que no haya disponibilidad de la misma.

En la figura 1 se aprecia un esquema del sistema eléctrico que lleva energía a la planta de producción. Como esta tiene una demanda que excede a la capacidad de generación propia, se conecta al Sistema Interconectado Nacional (SIN, de aquí en adelante) en tres puntos. Teniendo en cuenta que solamente el circuito C3 es la conexión permanente, los circuitos C1 y C2 pueden generar su propia energía y llevarla a la planta. Sin embargo, cuando falla la disponibilidad está como respaldo una conexión al SIN.

Figura 1. Esquema de conexión del sistema eléctrico de 34.5 KV a la planta industrial



Fuente: elaboración propia.

Trabajos similares realizados en el área

En las aplicaciones de gestión de energía eléctrica, Franco *et al.* (2008) propusieron un modelo de energización para comunidades que no están conectadas al SIN, combinando

Dinámica de Sistemas con sostenibilidad en el suroccidente de Colombia, simulando algunos escenarios de simulación. Un análisis del balance energético en la República del Ecuador lo propuso Barriga (2016) usando dinámica de sistemas y simulación. Altomonte (2017) estableció un modelo de desarrollo sostenible aplicado a la planificación energética usando un análisis holístico definiendo indicadores de sustentabilidad.

Con respecto al uso del modelado con Dinámica de Sistemas en áreas similares, Calpa-Oliva (2020) propuso un modelo de logística inversa para recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en la ciudad de Cali, usando simulación con Dinámica de Sistemas. Por otro lado, Liévano & Villada (2013) establecieron un modelo basado en Dinámica de Sistemas para la administración de inventarios. En cuanto a aspectos metodológicos, Bermeo & Villalba (2022) establecieron un modelo para transferencia de conocimiento y tecnología en entornos universitarios utilizando la Dinámica de Sistemas y la simulación de escenarios.

Modelado del sistema

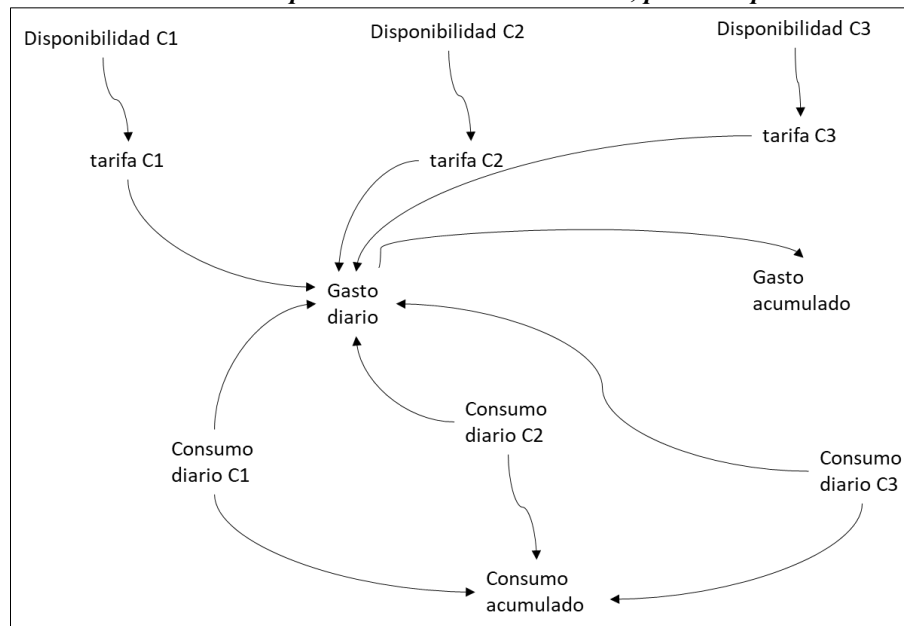
El sistema actual de gestión energética de la región de ejemplo puede delimitarse a tres subsistemas fundamentales, con sus variables más representativas:

- Subsistema de consumo de energía. Variables involucradas en consumo de energía:
 - Consumo en el año (kWh/año).
 - Consumo diario circuito C1 (kWh /día).
 - Consumo diario circuito C2 (kWh /día).
 - Consumo diario circuito C3 (kWh /día).
- Subsistema de tarifas. Abarca aquellas variables que involucran el costo de usar un kWh de energía, así como el índice de disponibilidad porcentual de la energía propia (generada). La disponibilidad ideal es la de 1 (100,00%), aunque hay obviamente puede disminuir debido a fallos en los componentes que generan la energía de consumo propio.
 - Tarifa del circuito C2. Se asume un valor fijo porque es energía cogenerada de acuerdo a un esquema de costos fijo.
 - Tarifa del circuito C3. Se asume un valor fijo por parte del sistema interconectado nacional.
 - Tarifa del circuito C1. Se asume un valor fijo porque es cogenerada.
 - Disponibilidad energía generada para el circuito C2, en porcentaje.
 - Disponibilidad energía generada para el circuito C3.
 - Disponibilidad energía generada para el circuito C1.
- Subsistema de costos. En este subsistema se relacionan aquellas variables que están asociadas al componente financiero del sistema, destinado a compras o generación de energía. La unidad monetaria es el peso colombiano (\$ COP).
 - Gastos diarios en compra de energía.
 - Gastos acumulados al año.
 - Presupuesto en energía al año.
 - Discrepancia entre dinero presupuestado y gastado.
 - Adiciones al presupuesto.
 - Cantidad de alarma, tope mínimo a partir del cual hay que gestionar una adición.

El medio utilizado para relacionar las variables es el diagrama causal, como una primera aproximación para determinar los ciclos de realimentación que rigen el sistema (Aracil, 1987). En el subsistema de consumo se relacionaron las variables que se relacionan con el consumo de energía en un período de tiempo. Dado que la necesidad de energía es variable y la energía

no se puede almacenar una vez generada, se consume o transmite lo generado en caso de excedentes. Los elementos se relacionaron según la figura 2:

Figura 2. Relación causal de variables para el subsistema de consumo, primera aproximación



Fuente: elaboración propia.

El consumo acumulado es la suma de los tres consumos diarios que se derivan de los circuitos C_1, C_2 y C3. Cuanto más se consume en uno de los circuitos, mayor será el consumo acumulado, lo que indica que son magnitudes directamente proporcionales. Para esta primera aproximación, las variables se relacionan linealmente, y no se presentan ciclos de realimentación.

Subsistema de tarifas

Para este subsistema los elementos son las tarifas de operación y el porcentaje de disponibilidad de cada circuito, el cual está acotado hasta un 100,00% (no hay apagones) y menor que ese valor indica la proporción de tiempo en que no hay energía disponible, sobre el total de tiempo. Por ejemplo, una disponibilidad del 95,00% indica que, en un año la suma de periodos de apagón sería de 18 días aproximadamente. La unidad de medida de las tarifas es el costo en pesos del kilovatio-hora.

Es fácil deducir que la disponibilidad de energía en cada circuito incidirá sobre la tarifa efectiva que se cobrará por consumo, siendo más benéfico una mayor disponibilidad debido a factores de economía de escala. Cuando no hay disponibilidad debido a un fallo en el componente de generación, se debe comprar energía que se transmite por el circuito 1, la cual se asume que es a una tarifa constante. Para el caso del circuito 1 esa disponibilidad es de cero en estos momentos, lo que indica que el consumo se paga de acuerdo a las tarifas comerciales en su totalidad. Igual razonamiento aplica para el circuito 2, el cual tiene un valor diferente de disponibilidad de energía generada.

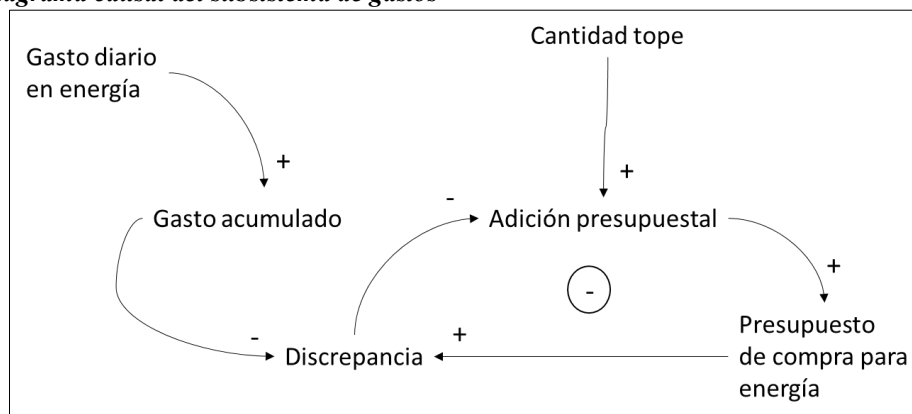
Subsistema de gastos

En este subsistema se muestran las variables que inciden en la compra de energía mediante ejecución de presupuesto. El diagrama que relaciona los elementos de este subsistema se aprecia en la figura 3, donde está presente un ciclo de realimentación negativo.

Como se muestra en la figura 3, los gastos diarios facturados por consumo de energía influyen positivamente sobre el gasto acumulado en el período en consideración. A su vez, los gastos acumulados disminuyen la discrepancia respecto a un nivel de gastos presupuestado (si aumentan mucho estos gastos acumulados entonces pueden sobrepasar la diferencia y ocasionar una cantidad faltante de dinero). A su vez lo presupuestado influye sobre la discrepancia, en el sentido de que un presupuesto mayor ocasionará una diferencia mayor. En este subsistema se presenta el único ciclo de realimentación del sistema actual. A medida que la discrepancia disminuye (se acerca lo gastado a lo presupuestado) se hace necesaria una adición presupuestal, la cual hará que aumente el presupuesto y por lo tanto vuelva a aumentar la discrepancia.

Como la acción recae sobre la discrepancia aumentándola luego de una disminución inicial, se concluye que este es un ciclo de realimentación negativo, lo cual indica que este subsistema tenderá hacia el control estable. Obviamente, existe una limitante en las adiciones presupuestales que actúa como límite al crecimiento. La cantidad tope es el monto de presupuesto que indica a partir de cual momento se hace necesaria una adición presupuestal (esta cantidad puede modificarse por políticas de la gestión de energía).

Figura 3. Diagrama causal del subsistema de gastos



Fuente: elaboración propia.

El sistema en su totalidad

Aunque fueron tomadas por separado estos diagramas parecen sencillos, sin embargo, si se toma el sistema en conjunto, empezarán a aparecer las relaciones entre los diversos subsistemas y se observarán los ciclos de realimentación, lo que indicará qué tan fácil es controlar a un sistema. Este sistema tiene un solo ciclo que se da en el subsistema de gastos, lo que indica que no pueden controlarse a voluntad los consumos, pero si solicitar más presupuesto para compras de energía.

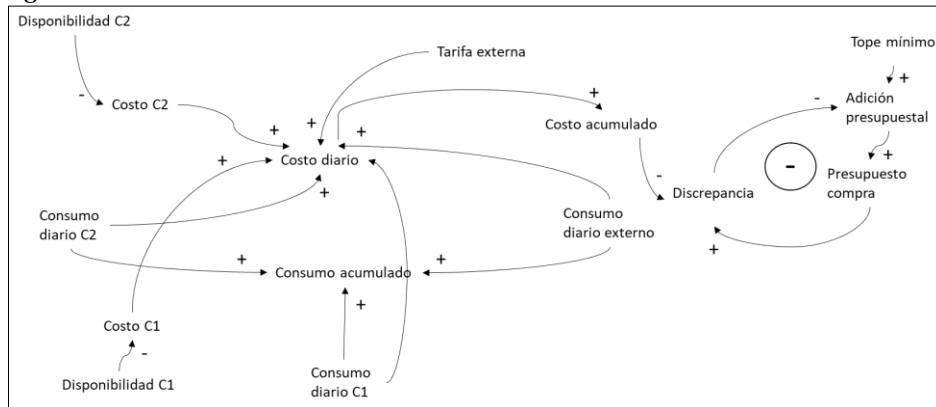
El sistema gana en complejidad no solo debido a que hay más elementos, sino a que aparecerán más relaciones sinérgicas, las que conectan un subsistema con otro. La figura 4 muestra el diagrama causal al acoplar estos subsistemas. El único ciclo de realimentación es el del subsistema financiero. También se puede apreciar la influencia de los consumos diarios por cada circuito en los gastos diarios, con lo que se relacionan los subsistemas de consumo, el tarifario y el financiero.

Representación estructural del sistema actual

Aplicando la metodología de Dinámica de Sistemas en sí se desarrolló un diagrama de Forrester o diagrama estructural, que le asigna a cada variable una función específica, y que de paso contribuye a organizar mejor el modelo, por cuanto ayuda a establecer las ecuaciones de simulación. En la figura 5 se puede apreciar esta representación estructural.

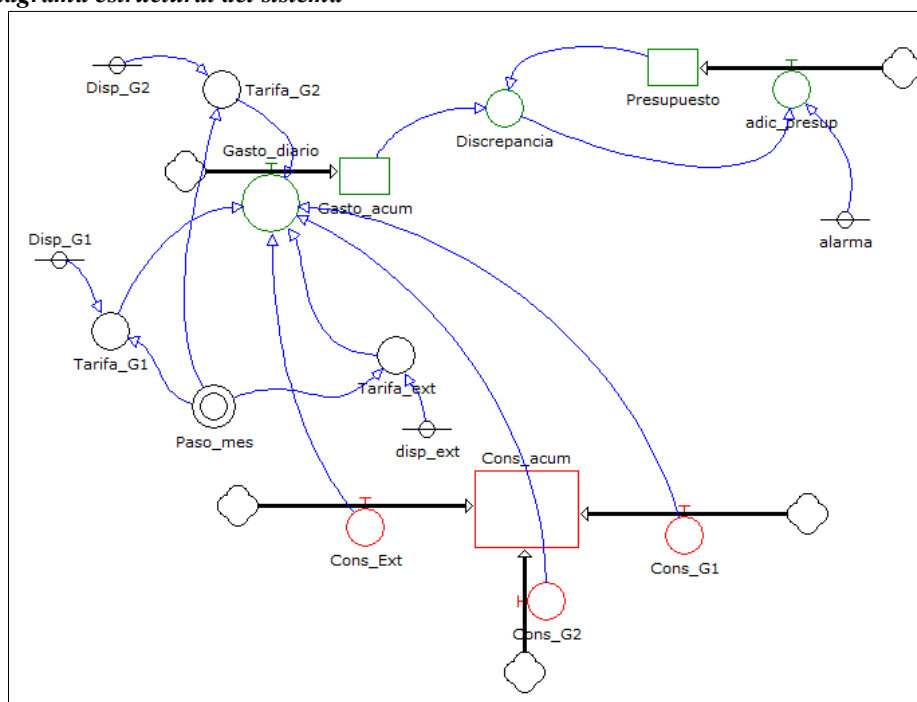
Dentro del diagrama estructural, los subsistemas aparecen con un color diferente, de la siguiente manera: Rojo para el subsistema de consumo, Verde para el subsistema financiero, Negro para el subsistema tarifario y demás variables. Las relaciones en línea negra gruesa indican que es flujo de material (en este caso fluye la electricidad en el subsistema de consumo, así como flujo de dinero en el subsistema financiero). Las relaciones en azul indican flujos de información, entre un elemento y otro.

Figura 4. Diagrama causal de todo el sistema actual



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Diagrama estructural del sistema



Fuente: elaboración propia.

Para describir mejor lo que hace cada variable, la tabla 1 explica la incidencia y significado de cada una de las variables en el sistema.

Tabla 1. Relación de variables utilizadas en el modelado del sistema actual

Variable	Tipo	Descripción
Cons_acum	Variable de estado (nivel)	Registra el consumo acumulado durante un período de tiempo (generalmente 360 días)
Gasto_acum	Variable de estado (nivel)	Dinero que se gasta durante un período de tiempo, por concepto del consumo y de la tarifa
Cons_ext	Variable de flujo (entrante)	Consumo diario de las zonas que están interconectadas con las redes eléctricas del SIN
Cons_g1	Variable de flujo (entrante)	Consumo diario de las zonas que están interconectadas con las redes eléctricas del circuito 1, que genera su propia energía
Cons_g2	Variable de flujo (entrante)	Consumo diario de las zonas que están interconectadas con las redes eléctricas del circuito 2, que genera su propia energía
Disp_g1	Parámetro constante	Probabilidad en que la energía sea brindada por el generador para el circuito 1. (72% por defecto)
Disp_c2	Parámetro constante	Probabilidad en que la energía sea brindada por el generador para el circuito 2. (95% por defecto)
Disp_c3	Parámetro constante	Probabilidad en que la energía sea brindada por la GCB, para la zona c3. Siempre disponible
Tar_ext	Variable auxiliar	Tarifa para el circuito externo (\$140). Es variable dependiendo del mes en que se encuentra, ya que la tarifa varía mensualmente.
Tarifa_c1	Variable auxiliar	Tarifa para la zona C1 (\$72 si la energía es brindada por la generadora, tarifa externa en caso contrario)
Tarifa_c2	Variable auxiliar	Tarifa para la zona C2 (\$72 si la energía es brindada por la generadora, tarifa externa en caso contrario)
Gastos	Variable de flujo (entrante)	Cantidad de dinero que se gasta a diario, para satisfacer el consumo industrial
Paso_mes	Variable exógena	Relación de conversión entre días y meses, para hallar el valor de la tarifa externa
Presupuesto	Variable de estado (nivel)	Cantidad de dinero que se supone se gastará en un año en compra de energía
Discrepancia	Variable auxiliar	Diferencia entre lo presupuestado y lo que se está gastando
Alarma	Parámetro constante	Valor a partir del cual se pide una adición presupuestal
Adicional	Variable de flujo (entrante)	Ingresos de dinero que se hacen a la cantidad presupuestada, a medida que se descende por debajo de la cantidad de alarma (descuadre en presupuesto).

Fuente: elaboración propia.

Ecuaciones del sistema

Con base en el diagrama estructural, las ecuaciones 1 y 2 son las que gobiernan el comportamiento del sistema.

Condiciones iniciales: Gasto acumulado, Consumo total en 0.

Presupuesto inicial: COP 6.000.000.000.

Los consumos en kWh por día son: 66500 del circuito 3, 88800 del circuito 1 y 34533 del circuito 2.

El gasto diario es:

$$\text{Gasto diario} = \text{consumo_c3} * \text{tarifa_c3} + \text{tarifa_c2} * \text{consumo_c2} + \text{consumo_c1} * \text{tarifa_c1} \quad (1)$$

$$\text{Discrepancia} = \text{Presupuesto} - \text{Consumo}. \quad (1)$$

Se hace una adición presupuestal de COP\$200.000.000 si la discrepancia es menor al tope mínimo que es de COP\$50.000.000. En el sistema hay un componente aleatorio: el cual indicarán probabilísticamente en qué momento el sistema tendrá tarifa de generación propia (la más conveniente) o tarifa externa al conectarse al SIN.

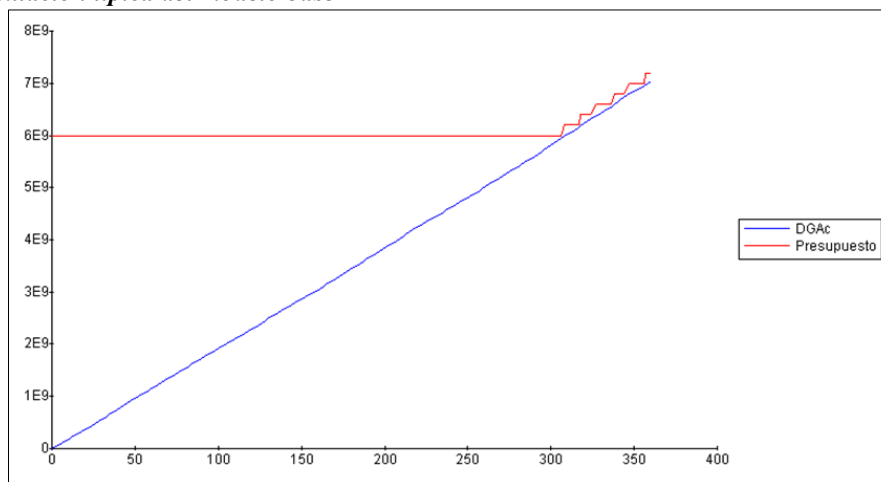
Tarifa a aplicar = si aleatorio < disponibilidad entonces tarifa propia, tarifa externa en caso contrario. (2)

También se aplica una regresión a la tarifa externa, de acuerdo al mes del año.

Simulaciones preliminares

Con los valores iniciales que se indicaron en las ecuaciones, se simuló el sistema y se observó el comportamiento de las variables de estado más representativas: El dinero gastado y el presupuestado. El horizonte de simulación es el de un año fiscal (360 días). Con los valores de los parámetros actuales, una gráfica típica de la simulación es la que se muestra en la figura 6, donde se muestra el valor del dinero presupuestado en energía, así como el gasto diario debido al consumo.

Figura 6. Simulación típica del modelo base

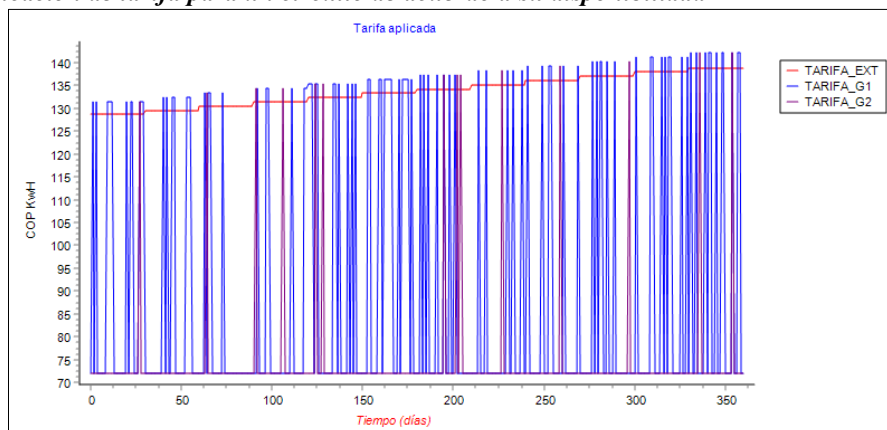


Fuente: elaboración propia.

A partir de la figura 6 se infiere que, si se presupuestan COP\$ 6.000.000.000 bajo los parámetros de consumo actuales y tarifas vigentes, es necesario hacer adiciones al presupuesto a partir de aproximadamente trescientos días (10 meses). Este comportamiento varía si aumenta o disminuye lo presupuestado, si se afecta el valor de alarma, o la cantidad a adicionar. La figura 7 presenta la aplicación de tarifa al consumo para los tres circuitos que componen el sistema.

En la figura 7 se observa que la tarifa externa (en rojo) sube escalonadamente durante todo el año, entre \$130 y \$140 COP por kWh. Las tarifas aplicadas a los circuitos son de casi la mitad, debido a las ventajas de la co-generación de energía. Sin embargo, debido al índice de disponibilidad (72,00% para el circuito 1 y 95\$ para el circuito 2) en algunas ocasiones se aplica un valor más alto debido a la compra externa al no poder satisfacer la demanda de energía.

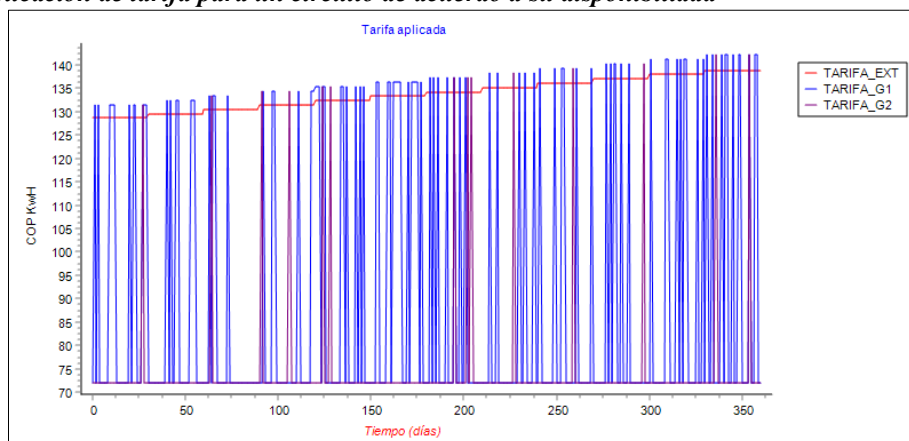
Figura 7. Aplicación de tarifa para un circuito de acuerdo a su disponibilidad



Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, revisando la sensibilidad de la disponibilidad de energía cogenerada con respecto al índice de disponibilidad, se simuló en detalle el valor del presupuesto de compra de energía variando la disponibilidad del generador del circuito 1, y se obtuvo el resultado mostrado en la figura 8. La tarifa externa (en rojo) sube escalonadamente durante todo el año, entre \$130 y \$140 COP por kWh. Las tarifas aplicadas a los circuitos son de casi la mitad, debido a las ventajas de la co-generación de energía. Sin embargo, debido al índice de disponibilidad (72% para el circuito 1 y 95\$ para el circuito 2) en algunas ocasiones se aplica un valor más alto debido a la compra externa al no poder satisfacer la demanda de energía.

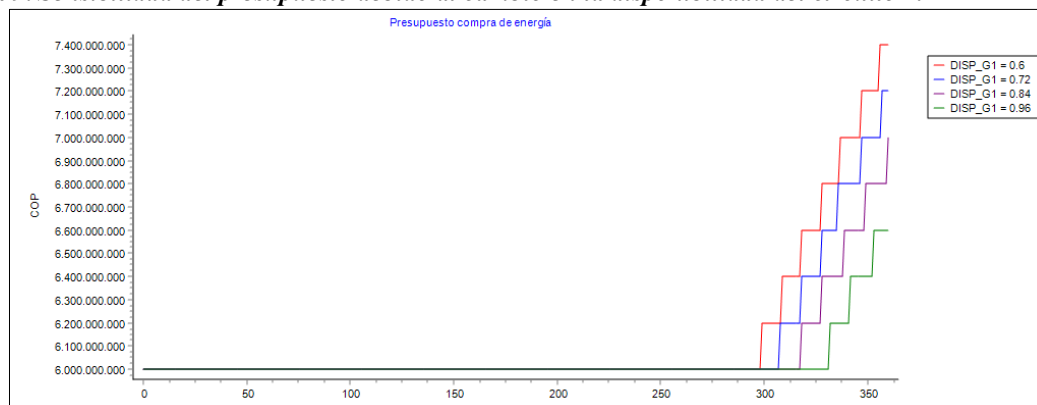
Figura 8. Aplicación de tarifa para un circuito de acuerdo a su disponibilidad



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, revisando la sensibilidad de la disponibilidad de energía cogenerada con respecto al índice de disponibilidad, se simuló en detalle el valor del presupuesto de compra de energía variando la disponibilidad del generador del circuito 1, y se obtuvo el resultado mostrado en la figura 9.

Con la menor disponibilidad de la energía generada (60,00%) se observa que la primera adición al presupuesto se lleva a cabo en el día 300, y se realizan 7 adiciones antes de terminar el año fiscal, para un total de COP \$7.400.000.000 en compras de energía. En el escenario base de 72,00% se hacen 6 adiciones, a partir del día 315. En el escenario de mejor disponibilidad (0,96%) se empiezan a hacer adiciones al presupuesto a partir del día 330, y unas tres adiciones presupuestales para un total de COP \$6.600.000.000.

Figura 9. Sensibilidad del presupuesto debido al cambio en la disponibilidad del circuito 1.

Fuente: Elaboración propia

Discusión

El análisis del sistema energético desarrollado en esta investigación cobra especial relevancia dentro del marco de los ODS, en particular el ODS 7: "Energía asequible y no contaminante", el ODS 9: "Industria, innovación e infraestructura" y el ODS 12: "Producción y consumo responsables". La modelación del sistema permitió identificar los desafíos asociados a la confiabilidad del suministro eléctrico en un complejo de producción de petróleo crudo, destacando la necesidad de estrategias que garanticen la eficiencia energética y la sostenibilidad económica.

Uno de los hallazgos clave radica en la relación entre la disponibilidad de energía generada internamente y el costo asociado al consumo eléctrico. La dependencia parcial del SIN implica variaciones en los costos operativos, lo que a su vez incide en la estabilidad financiera del complejo. Esto sugiere la necesidad de optimizar la generación propia y reducir la dependencia de fuentes externas, alineándose con la meta 7.3 de los ODS, que busca mejorar la eficiencia energética a nivel global.

Desde la perspectiva del ODS 9, el estudio resalta la importancia de fortalecer la infraestructura eléctrica y promover la innovación tecnológica en la gestión energética. La simulación de escenarios permite proyectar el impacto de diferentes estrategias de inversión en infraestructura energética, orientadas a mejorar la resiliencia del sistema ante fluctuaciones en la oferta y la demanda. La integración de modelos predictivos basados en Dinámica de Sistemas representa una herramienta útil para la planificación estratégica, contribuyendo a la toma de decisiones fundamentadas en datos.

En cuanto al ODS 12, la investigación evidencia la necesidad de implementar políticas de optimización en el consumo de energía. La discrepancia entre el presupuesto inicial y el gasto real sugiere oportunidades para mejorar la eficiencia en el uso de recursos, promoviendo prácticas de consumo responsable en entornos industriales. Medidas como la diversificación de fuentes energéticas y la incorporación de tecnologías de almacenamiento podrían contribuir a reducir la volatilidad en los costos, fomentando una producción más sostenible.

Los resultados obtenidos sugieren que la sostenibilidad del sistema energético no solo depende de la generación y distribución de electricidad, sino también de la capacidad de las organizaciones para adaptar sus estrategias de gestión a un entorno dinámico. La modelación desarrollada proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas, permitiendo evaluar alternativas que equilibren la viabilidad económica con el cumplimiento de los ODS.

Conclusiones

Los resultados de esta investigación destacan la importancia de un enfoque sistémico para la gestión energética en entornos industriales, particularmente en el sector de producción de petróleo crudo. A través de la modelación con Dinámica de Sistemas, se logró identificar las principales variables que afectan el desempeño energético del complejo analizado, permitiendo evaluar el impacto de diferentes estrategias en la eficiencia operativa y financiera. Uno de los hallazgos más relevantes es la relación entre la disponibilidad de energía generada internamente y la estabilidad económica del sistema.

La dependencia parcial del SIN genera fluctuaciones en los costos de operación, lo que sugiere la necesidad de optimizar la autogeneración eléctrica y mejorar la planificación del consumo energético. En este sentido, la implementación de estrategias de diversificación y almacenamiento de energía podría contribuir a una mayor estabilidad y reducción de costos a largo plazo.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad, este estudio evidencia la necesidad de alinear la gestión energética con los ODS, en particular el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables). La optimización del uso de recursos y la integración de tecnologías innovadoras en la generación y distribución de energía son elementos clave para garantizar un desarrollo industrial más sostenible y resiliente. Asimismo, la modelación aplicada demuestra ser una herramienta efectiva para la toma de decisiones estratégicas en contextos de alta incertidumbre.

La posibilidad de simular distintos escenarios futuros proporciona a los gestores una visión más clara sobre las consecuencias de sus decisiones, permitiéndoles diseñar políticas más eficientes y sostenibles. Por lo tanto, esta investigación contribuye a la comprensión de los desafíos asociados a la gestión energética en la industria y subraya la importancia de una planificación basada en modelos predictivos. Se recomienda continuar explorando estrategias de eficiencia energética, almacenamiento y diversificación de fuentes, con el fin de mejorar la sostenibilidad y competitividad del sector en un contexto de creciente demanda y transición energética.

Referencias

- Altomonte, H. (2017). La evolución del concepto de energía y desarrollo sostenible al de planificación energética sostenible. *ENERLAC. Revista De energía De Latinoamérica Y El Caribe*, 1(2), 10–23. <https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/21>
- Aracil J., & Gordillo, F. (1997). *Dinámica de sistemas*. España: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Barriba, H. (2016). Análisis del Balance Energético del Ecuador a través de Dinámica de Sistemas. *Compendium: Cuadernos De Economía Y Administración*, 2(4), 61-78. <https://www.revistas.espol.edu.ec/index.php/compendium/article/view/76>
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183-210. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291099-1727%28199623%2912%3A3%3C183%3A%3AAID-SDR103%3E3.0.CO%3B2-4>

- Bautista, G., & Aranguren, M. (2021). Responsabilidad social corporativa en el sector de telefonía celular. *Infometric@ - Serie Ciencias Sociales y Humanas*, 4(1), 1-23. <https://www.infometrica.org/index.php/ssh/article/view/159>
- Bermeo, M., Villalba, M., & Ruiz, W. (2022). Visión sistémica de la transferencia de conocimiento y tecnología en la universidad. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 30(1), 89-112. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-68052022000100089
- Blanco, C. Y., Gelviz, M., Ramírez, B. C., Sanguino, N. G. S., Ortiz, S. M. T., & Mogollón, J. M. G. (2020). Plan estratégico dirigido a la empresa Seguros La Equidad en tiempos del covid-19. *Infometric@-Serie Sociales y Humanas*, 3(1), 131-157. <http://infometrica.org/index.php/ssh/article/view/135>
- Calpa-Oliva, J. (2020). Validación de un modelo de logística inversa para la recuperación de los RAEE de la ciudad de Cali, basado en el Pensamiento Sistémico usando una simulación con Dinámica de Sistemas. *Tecnológicas*, 23(48), 55-81. <https://www.redalyc.org/journal/3442/344263272004/html/>
- De-Leo, E. & Aranda, D., & Addati, G. A. (2020). *Introducción a la dinámica de sistemas, Serie Documentos de Trabajo, No. 739*. Argentina: Universidad del Centro de Estudios Macroeconómicos de Argentina (UCEMA). <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/238364/1/739.pdf>
- Law, A., & Kelton, D. (2004). *System Simulation*. Third Edition. Houston: McGraw-Hill.
- Liévano, F., & Villada, J. (2014). Un modelo de Dinámica de sistemas para la administración de inventarios. *Revista Soluciones de Postgrado*, 6(11), 121-135. <https://revistabme.eia.edu.co/index.php/SDP/article/view/565>
- Pinillos-Villamizar, J. A., & Ochoa-Torres, A. (2021). Impuesto sobre la renta de personas naturales en Colombia y el principio de progresividad. *Infometric@ -Serie Sociales Y Humanas*, 4(2), 1-8. <http://infometrica.org/index.php/ssh/article/view/160>
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. US: McGraw-Hill.