



MODELADO Y SIMULACIÓN MEDIANTE DINÁMICA DE SISTEMAS PARA AUDITORÍAS ENERGÉTICAS A EDIFICIOS DE ADMINISTRACIÓN PÚBLICA EN COLOMBIA

MODELING AND SIMULATION USING SYSTEM DYNAMICS FOR ENERGY AUDITS OF PUBLIC ADMINISTRATION BUILDINGS IN COLOMBIA

¹Alexander Cortés Llanos, ²Alba Dalila Ángel Rodríguez,
³Gerson David Cruz Capador, ⁴Mónica Montoya Cortés

^{1,2,3}Universidad Nacional Abierta y a Distancia / Universidad ECCI /
Escuela Militar de Cadetes General "José María Córdova", Colombia

Recibido: 15/05/2024 Aprobado 20/10/2024

RESUMEN

Actualmente Colombia y el mundo se ven enfrentados a los retos relacionados con la transición energética. Dos elementos fundamentales se contemplan para llegar a lograr satisfactoriamente este proceso: las fuentes no convencionales de energía renovable y la eficiencia energética. El presente trabajo tiene como objetivo presentar un modelo y los resultados de simulación de una auditoría energética para edificios pertenecientes a las administraciones públicas, siguiendo lo establecido en el Plan Nacional de Desarrollo "Colombia potencia mundial de la vida" en su artículo 237 de la Ley 2294 del 2023 y como complemento a la resolución 016 de 2024 de la Unidad de Planeación Minero-Energética UPME. El modelo integra aspectos de tipo técnico, económico y organizacional que permite identificar bajo la simulación diferentes escenarios para la toma de decisiones en relación con las oportunidades de mejora para lograr eficiencia energética y por ende ahorros relacionados con el costo del consumo energético. Se ha utilizado el software Stella Architect V3.2.1¹ para el modelo basado en dinámica de sistemas y el intercambio de datos con hojas de cálculo para la información energética que hacen parte de la línea base y línea meta.

Palabras clave: dinámica de sistemas, eficiencia energética, ahorros energéticos, línea base energética, meta energética, modelado y simulación.

Citación: Cortes Llanos, A., Angel Rodriguez, A. D., Cruz Capador, G. D., & Montoya Cortes, M. (2024). Modelado y simulación mediante dinámica de sistemas para auditorías energéticas a edificios de administración pública en Colombia. *Publicaciones E Investigación*, 18(3). <https://doi.org/10.22490/25394088.8473>

¹alexander.llanos@unad.edu.co / <https://orcid.org/0000-0002-5337-0377>

²aangelr@ecci.edu.co / <https://orcid.org/0000-0002-2035-8072>

³gcruz@ecci.edu.co / <https://orcid.org/0000-0002-3723-7509>

⁴monica.montoya@esmic.edu.co / <https://orcid.org/0009-0007-2454-7931>

<https://doi.org/10.22490/25394088.8473>



ABSTRACT

Colombia and the world are currently facing challenges related to the energy transition. Two fundamental elements are contemplated to successfully achieve this process: non-conventional renewable energy sources and energy efficiency. This paper aims to present a model and simulation results of an energy audit for buildings belonging to public administrations, following the provisions of the National Development Plan “Colombia World Power of Life” in Article 237 of Law 2294 of 2023 and as a complement to Resolution 016 of 2024 of the Mining-Energy Planning Unit UPME. The model integrates technical, economic and organizational aspects that allow identifying under simulation different scenarios for decision making in relation to improvement opportunities to achieve energy efficiency and therefore savings related to the cost of energy consumption. Stella Architect V3.2.1 software has been used for the model based on System Dynamics and data exchange with spreadsheets for the energy information that are part of the Baseline and Target line.

Keywords: System dynamics, energy efficiency, energy savings, energy baseline, energy target, modeling and simulation.



1. INTRODUCCIÓN

Con la ley 697 del año 2001, Colombia ha venido estableciendo un marco de promoción, divulgación, formulación de políticas y asesoría a organizaciones para el uso eficiente y racional de la energía. A partir de este momento se elabora el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía – PROURE, el cual determina las metas de ahorro energéticas por sector y las acciones y medidas de eficiencia energética para un tiempo de 8 años. Actualmente se presenta la tercera versión del programa para el periodo 2022-2030 (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2022).

En enero del 2024 la Unidad de Planeación Minero Energética UPME, oficina técnica del Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia emite la Resolución 016 del 2024 (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2024), que establece la metodología para el cálculo, actualización y ajuste de la línea base de consumo energético (LBEn) y ahorro estimado, con aplicación en edificios de administración pública de todo el país para dar cumplimiento a la auditoría obligatoria y con periodicidad de 4 años que establece el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 en su artículo 237 de la Ley 2294 (Departamento Nacional de Planeación DNP, 2023).

En este orden de ideas, la normativa indica la obligatoriedad de las auditorías, sin embargo, no define

un modelo a seguir. Los resultados presentados en este artículo se derivan de la aplicación de la dinámica de sistemas en la auditoría energética.

La dinámica de sistemas SD fue desarrollada y propuesta a finales de los años 50 por Jay W. Forrester en el Instituto Tecnológico de Massachussets. Desde comienzo de los años 2000 han existido trabajos que relacionan la utilización de SD con diferentes áreas de la energía como: combustibles fósiles (Yunna *et al.*, 2015), renovables (Eker, 2015), electricidad (Franco *et al.*, 2015) y recursos relacionados con la energía (Kasada *et al.*, 2015).

La dinámica de sistemas SD es un enfoque de sistemas o mejor un enfoque pensando en sistemas, donde los componentes son concebidos como acumuladores (stocks), flujos (flows) y variables auxiliares (converters) con lazos de realimentación (feedbacks) entre ellos (Lane, 2000). La dinámica de sistemas es una herramienta de modelado para el estudio de transiciones energéticas y sostenibles, dado que analiza de manera explícita las realimentaciones causales entre factores interconectados. Además, refuerza la abstracción de los niveles operativos, tácticos y estratégicos, siendo una herramienta crítica en la conceptualización y evaluación de transiciones energéticas locales (Selvakumar & Ahlgren, 2020).

En la revisión del estado del arte se encontraron trabajos relacionados con el modelado utilizando la técnica basada en agentes (ABM) y dinámica de sistemas (SD) aplicado a eficiencia energética en edificios de oficinas. La ocupación de los edificios es dinámica y cambia sobre el tiempo bajo influencias formales e informales. En Ali *et al.* (2020) se presenta un estudio que recoge datos de ocupación de 3 edificios en grandes ciudades de Pakistán donde se presentan como resultados un 25 % de ahorros energéticos potenciales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio es llevado a cabo en 5 pasos (1) identificación de las variables principales de la auditoría energética y su relación a través del diagrama de lazo

causal CLD, (2) importación de datos energéticos para la línea base LBEn y línea meta (3) construcción del diagrama de stock-flow para la gestión operativa, ahorros en costos y oportunidades de mejora, (4) Simulación del modelo sin aplicar acciones para mejorar la eficiencia energética, (5) Análisis de escenarios con acciones de mejora para la eficiencia energética que se implementara posteriormente.

El diagrama de lazo causal CLD es construido teniendo en cuenta los lineamientos relacionados en la Resolución 016 y la Guía para la formulación e implementación de planes de gestión eficiente de la energía en entidades públicas (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2018) de la UPME. Se integró como variables la línea base, línea meta, gestión operativa y oportunidades de mejora (ver Figura 1).

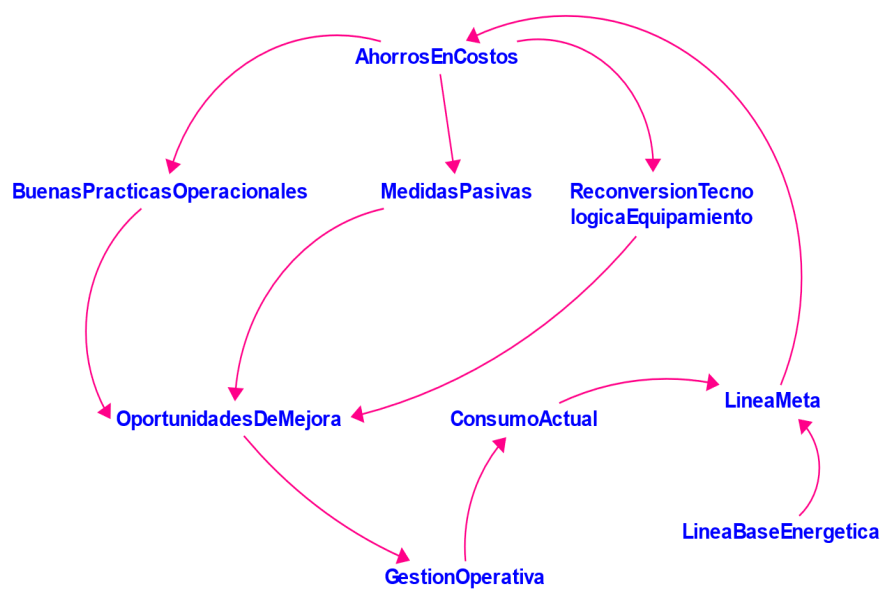


Figura 1. Diagrama de lazo causal modelo de auditoría energética en edificios.

En el diagrama de stock-flow aparecen tres grandes grupos que fueron construidos en el siguiente orden: Línea base y línea meta, Gestión operativa y Oportunidades de mejora.

Para el primer grupo, Línea base y línea meta, se crearon variables que son conectadas a través de la ventana de importación de Stella Architect. Los datos son tomados del anexo 3 de la Unidad de Planeación

Minero Energética (UPME, 2024), donde como ejemplo se toma un edificio de una alcaldía municipal con un sótano y 4 pisos de oficinas (ver Figura 2).

Para el segundo grupo, la gestión operativa, trata de identificar aquellas características relacionadas con el propio uso de la energía del edificio. El modelo incluye el consumo de energía destinado a iluminación, climatización y equipos informáticos. Para la

parametrización del modelo se tomaron datos nominales de potencia para los paneles led (40 W), aires acondicionados (350 W) y un promedio para equipos informáticos (120 W). Para la tasa de consumo de iluminación se tomó el área del edificio (2.458 m²). Los tres usos significativos de energía contemplan las horas y el factor de utilización que se encuentra entre 6 - 8 horas y entre 40 % - 60 % respectivamente.

Para el tercer grupo, las oportunidades de mejora, contemplan los siguientes grupos de medidas de eficiencia energética: buenas prácticas operacionales (BPO), medidas pasivas y reconversión tecnológica, el primer grupo de medidas se pueden implementar sin necesidad de tener asignado un presupuesto, sin embargo, para las acciones de los siguientes dos grupos

es necesario utilizar los ahorros generados por el uso racional y eficiente de la energía como lo estipula la Resolución 016 del 2024, reflejando un modelo sostenible en el tiempo (ver Figura 2).

3. DESARROLLO

Posterior a crear la estructura y parametrización del modelo, se importan 36 datos para la línea base. Con el fin de pronosticar para los años siguientes, se toma como tiempo de simulación 12 meses. Según la metodología de la línea meta, su construcción requiere tomar los puntos que están por debajo de la línea base, con la premisa que, si este consumo se repite, se puede volver a construir y de esta forma obtener ahorros energéticos.

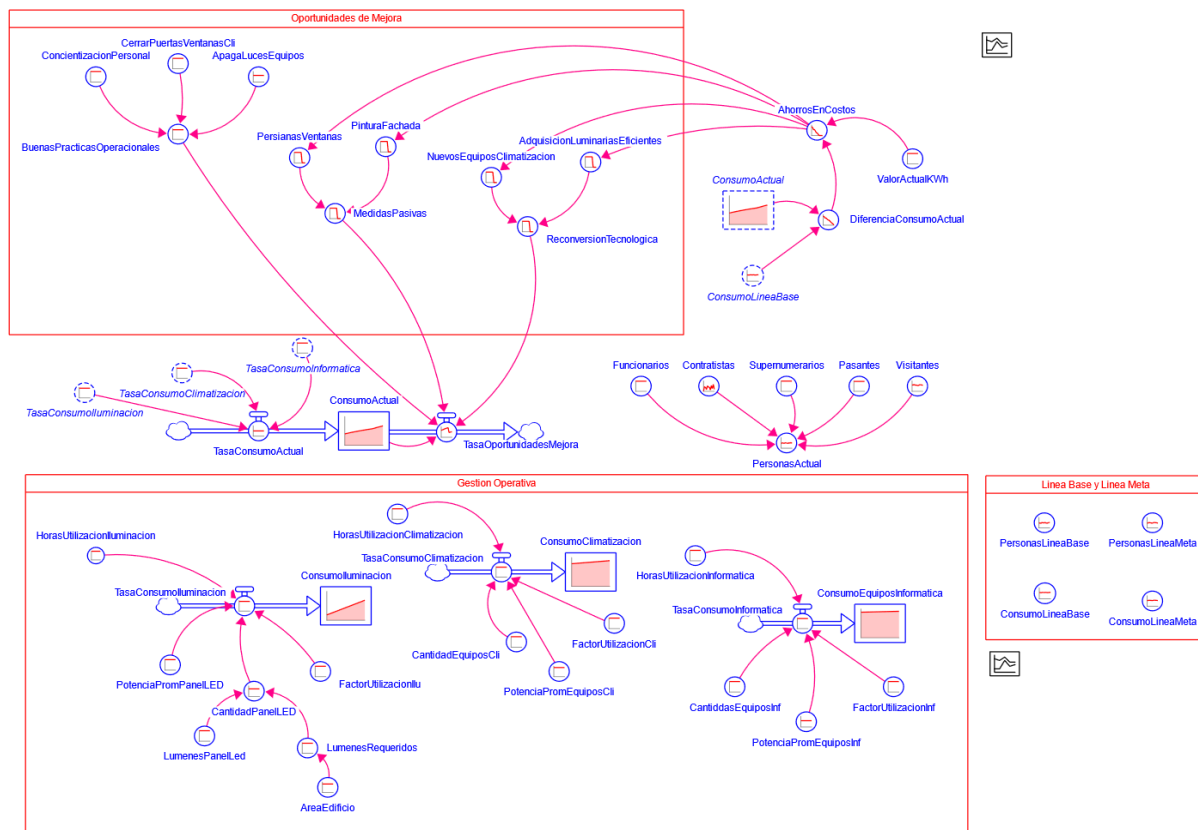


Figura 2. Diagrama stock-flow modelo de auditoría energética en edificios.

Al simular el modelo con los parámetros iniciales graficamos los datos de la línea base (azul) y línea meta (rojo) (ver Figura 3).

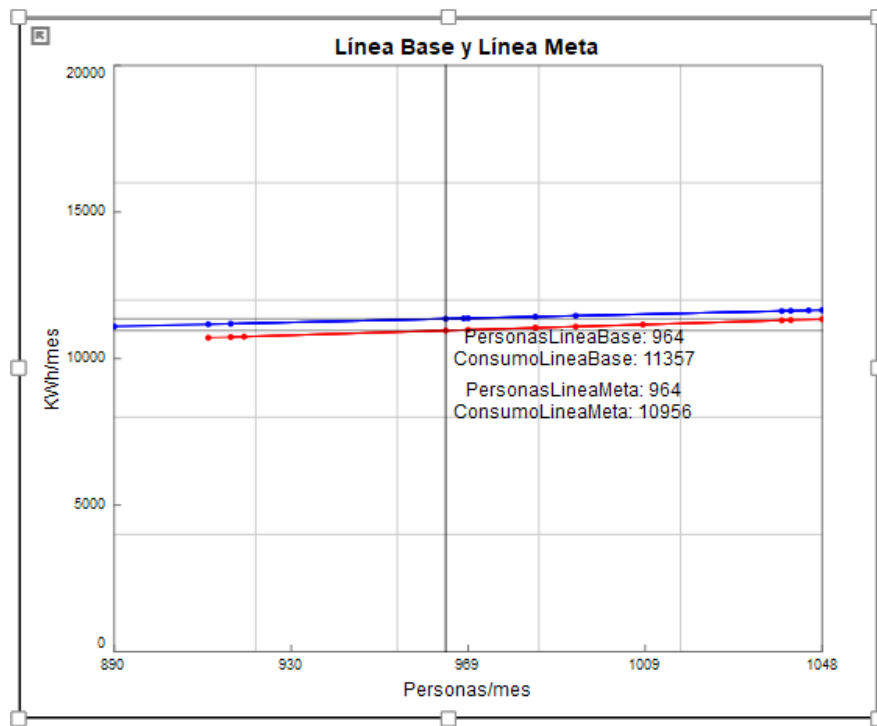


Figura 3. Comparación línea base y línea meta.

En el módulo de gestión operativa, se construyen los submodelos de usos significativos de energía, para este caso: iluminación, climatización y equipos informáticos (ver Figura 4).

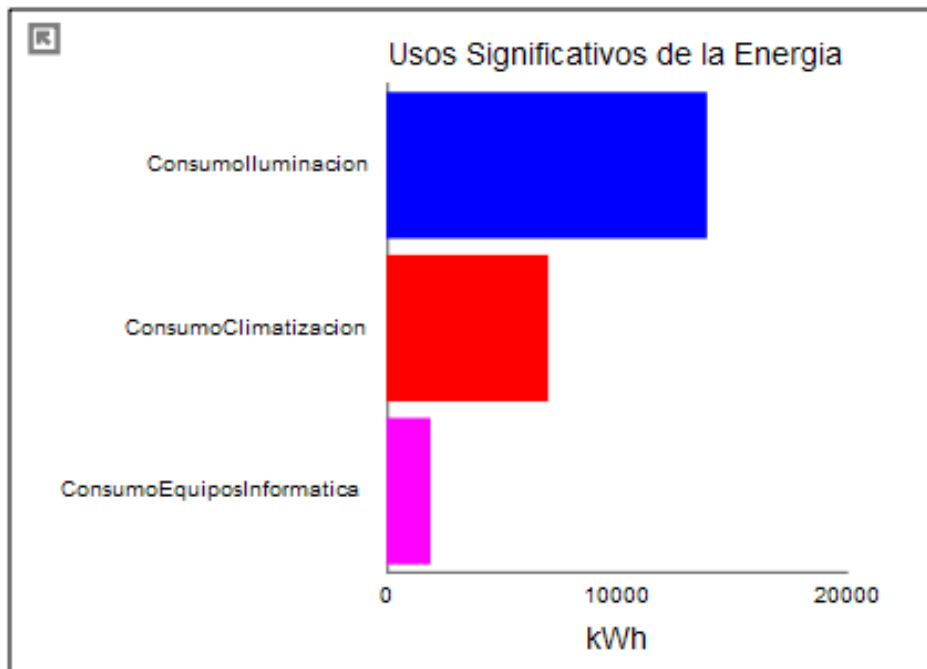


Figura 4. Principales usos de la energía.

4. DISCUSIÓN

4.1 Tiempo de uso

Inicialmente el tiempo de uso de los sistemas de iluminación, climatización y equipos de informática

es 8 horas, que comprende a una jornada de trabajo de lunes a sábado. Los resultados presentan un consumo por debajo de la línea meta (puntos rojos) en 6 meses del año (ver Figura 5).

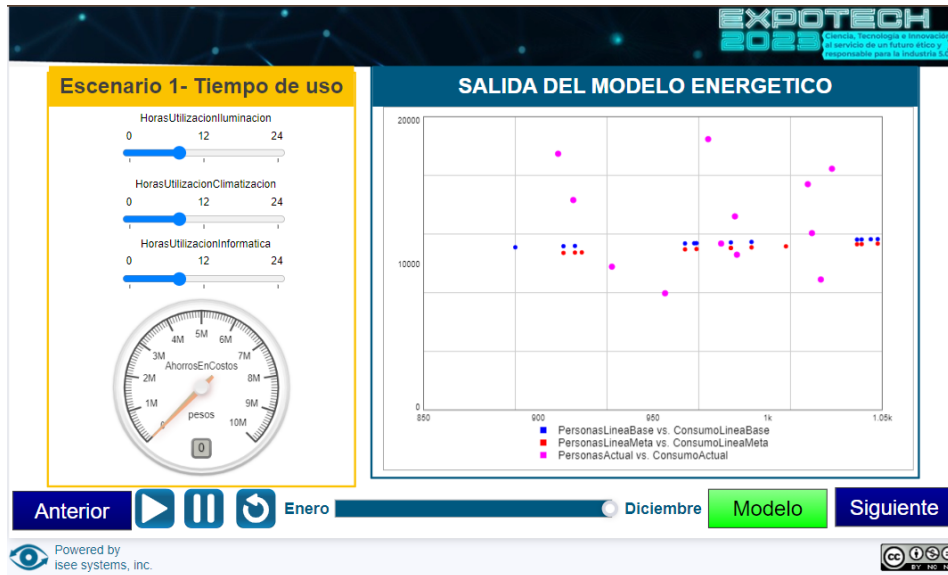


Figura 5. Resultados para 8 horas de uso de los sistemas.

Si se enciende la iluminación del edificio solo la mitad de la jornada laboral 4 horas, o se enciende cuando sea especialmente necesario, se logra un

ahorro económico en la simulación de 1.560.000 COP en el año posterior (ver Figura 6).

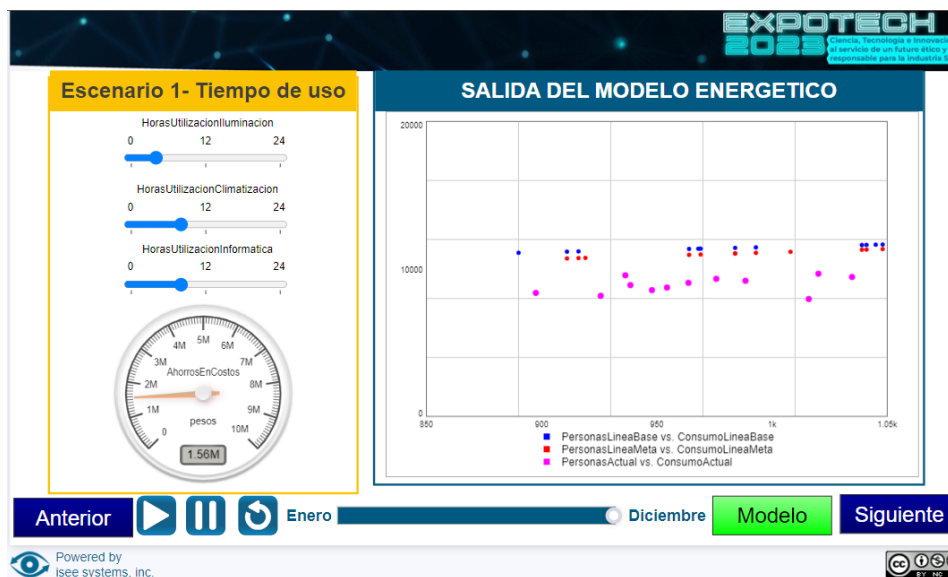


Figura 6. Resultados para 4 horas de uso del del sistema de iluminación.

4.2 Buenas prácticas operacionales

Inicialmente en el edificio se tienen 3 estrategias para trabajar con los ocupantes: concientización del personal para el uso racional de la energía que aporta

un 1 % de ahorro, cerrar puertas y ventanas para mantener la temperatura al interior con 0.5 % y apagar luces que no son necesarias 1.3 %. En la Figura 7, se evidencia que con estas metas no se alcanza ahorro.

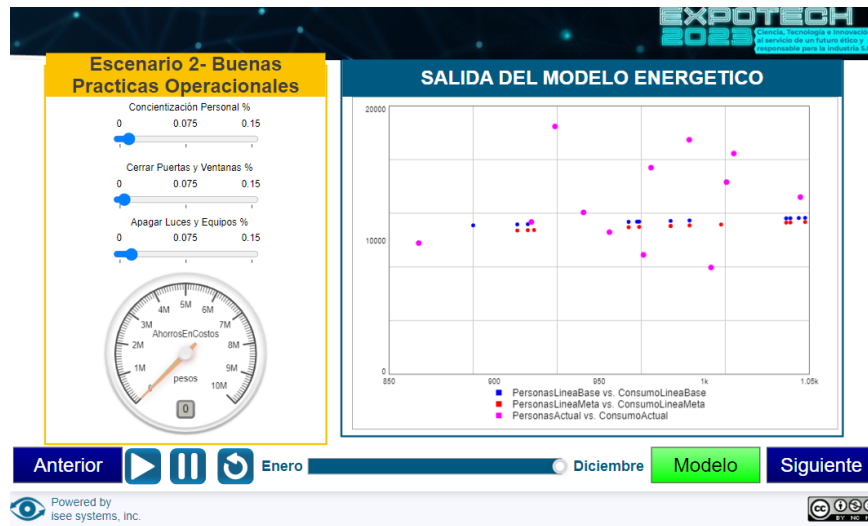


Figura 7. Resultados con metas conservadoras para las BPO.

Se plantea un mayor compromiso para las estrategias de concientización del personal y apagar luces que no sean necesarias del 5 % para cada una. Los resultados de los ahorros para el siguiente año son de 1.470.000 COP.

4.3 Reversión tecnológica

Con este tercer escenario se desea pronosticar el impacto que puede tener al tener iluminación mas eficiente para lo cual se cambia de tener paneles led que consumen 40 a 20 vatios. En la Figura 8 los resultados son un ahorro de 1.560.000 COP.

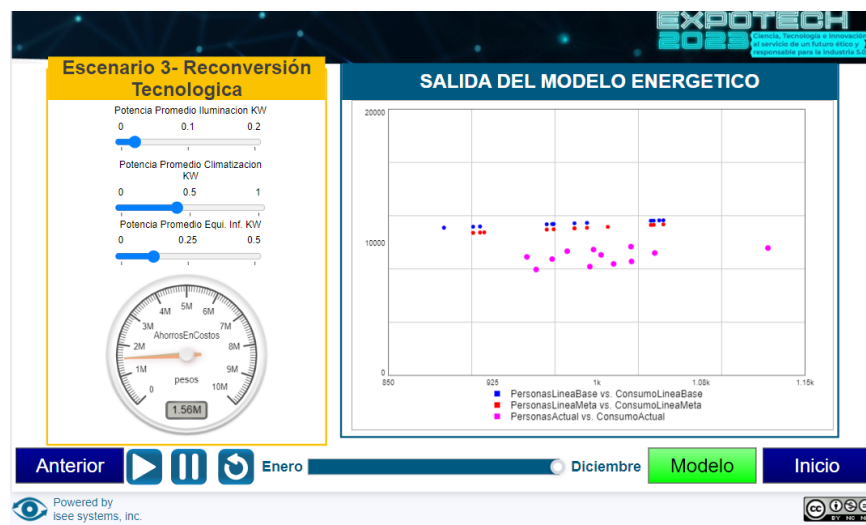


Figura 8. Resultados para una potencia de 20 vatios para los paneles led.

Los escenarios se pueden evaluar por separado teniendo en cuenta estrategias de tiempo de uso, buenas prácticas operacionales o reconversión tecnológica. Sin embargo, se puede tener escenario donde se contemplan las tres. En el siguiente enlace se puede acceder a la evaluación de los escenarios en la web, con el fin que el lector pueda establecer más pruebas y sus correspondientes validaciones.

<https://exchange.iseesystems.com/public/alexandercortes/auditoria-energetica-edificios>

5. CONCLUSIONES

El modelado bajo el enfoque de dinámica de sistemas, aplicado a auditorías energéticas en edificios de oficinas, permite contemplar aspectos de ingeniería, económicos, de política empresarial, de infraestructura, de migración tecnológica, entre otros, en un único contexto. A medida que se comprenda mejor por parte de la organización la importancia del diagnóstico, el análisis y los potenciales ahorros energéticos será sostenible en el tiempo la eficiencia energética.

El modelo presentado puede ser calibrado a través de un proceso de optimización que incluye el software con el fin de obtener los valores de parámetros que mejor se acerquen a la línea base, con esto se lograría que las acciones que hacen parte de las oportunidades de mejora sean alcanzables y no aspiracionales.

Las estrategias de los escenarios presentados pueden ser combinadas, si se trabaja en los tiempos de uso, buenas prácticas operacionales y reconversión tecnológica se pueden lograr un ahorro de 6.380.000 por año.

La exportación de datos del modelo a archivos XMLE y txt de Equation Viewer puede permitir hacer análisis off-line con herramientas de modelado de datos como las librerías de Python y R que pueden ayudar a complementar y ajustar el modelo creado en Stella Architect.

AGRADECIMIENTOS

A la prestigiosa Escuela Militar de Cadetes General José María Córdova y la Facultad Administración Logística. El presente trabajo hace parte de la primera etapa del proyecto FADLOG-02-2024-NF: “De los modelos matemáticos a la simulación de procesos logísticos. Una perspectiva práctica.”

A la empresa Software Shop en Colombia por permitir utilizar la licencia de Stella Architect V3.2.1 para el desarrollo de este proyecto de investigación.

REFERENCIAS

- Ali, Q., Thaheem, M., Ullah, F., & Sepasgozar, S. (2020). The Performance Gap in Energy-Efficient Office Buildings: How the Occupants Can Help? *Energies*, 6(1480), 13. <https://doi.org/10.3390/en13061480>
- Departamento Nacional de Planeación DNP. (19 de mayo de 2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. <https://www.dnp.gov.co/plan-nacional-desarrollo/pnd-2022-2026>
- Eker, S. D. (2015). A model-based analysis of biomethane production in the Netherlands and the effectiveness of the subsidization policy under uncertainty. *Energy Policy*, 82, 178-196.
- Franco, C. J., Castaneda & Dyrer, I. M. (2015). Simulating the new British Electricity-Market Reform. *European Journal of Operational Research*, 245(1), 273-285.
- Kasada, R., Kwon, S., Konishi, S., Sakamoto, Y., Yamanishi, T. & Tobita, K. (2015). A system dynamics model for stock and flow of tritium in fusion power plant. *Fusion Engineering and Design*, 98-99, 1804-1807.
- Lane, D. C. (2000). Should system dynamics be described as a ‘hard’ or ‘deterministic’ systems approach? *Systems Research and Behavioral Science*, 17(1), 3-22. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1743\(200001/02\)17:1%3C3::AID-SRES344%3E3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1743(200001/02)17:1%3C3::AID-SRES344%3E3.0.CO;2-7)
- Selvakkumaran, S. & Ahlgren, E. O. (2020). Review of the use of system dynamics (SD) in scrutinizing local. *Journal of Environmental Management*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111053>
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (17 de enero de 2024). *Anexo Metodología de la línea base de consumo y ahorro estimado*. https://www1.upme.gov.co/Normatividad/Anexo_Res016_2024.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (17 de enero de 2024). *Resolucion 016 del 2024*. https://www1.upme.gov.co/Normatividad/016_2024.pdf

Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2022). *Programa de uso racional y eficiente de la energía - PROURE*. <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/PROURE.aspx>

Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2018). *Guía para la formulación e implementación de Planes de Gestión, PGEE - EP*. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/UPME_Guia_implementacion_PGEE_EE.pdf

Yunna, W., Kaifeng, C., Yisheng, Y. & Tiantian, F. (2015). A system dynamics analysis of technology, cost and policy that affect the market competition of shale gas in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 235-243.