

Metodología para el Modelado de algunos Aspectos Asociados a la Sostenibilidad Empresarial y su Aplicación en una Empresa Manufacturera

Orlando Valencia-Rodríguez^{(1)(2)*}, Gerard Olivar-Tost⁽³⁾ y Johan M. Redondo⁽⁴⁾

(1) Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial, Campus la Nubia, Bloque Q, 2º piso, Manizales, Código Postal 170001, Colombia.
(e-mail: ovalenciaro@unal.edu.co)

(2) Universidad Autónoma de Manizales, Departamento de Física y Matemáticas, Manizales-Colombia
(e-mail: orlandovr@autonoma.edu.co)

(3) Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Matemática y Estadística, Campus la Nubia, Manizales, Código Postal 170001, Colombia. (e-mail: golivart@unal.edu.co)

(4) Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Bogotá-Colombia
(e-mail: jmredondo@ucatolica.edu.co)

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

Recibido Oct. 23, 2018; Aceptado Dic. 19, 2018; Versión final Feb. 20, 2019, Publicado Ago. 2019

Resumen

Se plantea una metodología para el modelado de la sostenibilidad empresarial basado en la dinámica de sistemas e integrando elementos del análisis matemático, estadístico y de los sistemas dinámicos. Para ello, se revisan los aspectos generales referentes al desarrollo sostenible. Entre estos, las características e indicadores relacionados con la empresa sostenible, los conceptos claves de la dinámica de sistemas, los sistemas dinámicos y el modelamiento de la sostenibilidad empresarial. Se detalla la metodología propuesta y luego se describe su aplicación al caso específico de una empresa manufacturera de carácter nacional. Mediante la construcción del modelo, su simulación y análisis se logra establecer acciones de sostenibilidad relacionadas con la gestión del talento humano, el ahorro energético y la generación de residuos sólidos. El modelo desarrollado permite a la empresa analizar diversas alternativas y observar si contribuyen a mejorar el desempeño de la empresa.

Palabras clave: desarrollo sostenible; sostenibilidad empresarial; modelamiento; dinámica de sistemas; sistemas dinámicos

Methodology for the Modeling of some Aspects Associated with Business Sustainability and its Application in a Manufacturing Company

Abstract

A methodology for the modeling of business sustainability that is based on the dynamics of systems and integrating elements of mathematical, statistical and dynamic systems analysis is proposed. For this, the general aspects referring to sustainable development are reviewed. Among this are, the characteristics and indicators related to sustainable business, the key concepts of systems dynamics, dynamic systems and the modeling of business sustainability. The proposed methodology is detailed and its application to the specific case of a national manufacturing company is described. Through the construction of the model, its simulation and analysis, it was possible to establish sustainability actions related to human talent management, energy saving and the generation of solid waste. The methodology and the proposed model allow the company to define improvement alternatives that contribute to better business performance.

Keywords: sustainable development; business sustainability; modeling; dynamic of systems; dynamic systems

INTRODUCCIÓN

Las preocupaciones que han tenido las empresas relacionadas con los aspectos financieros, económicos y sociales, hoy en día se resumen en un gran reto y es el de la sostenibilidad empresarial. No se puede negar que el factor económico ha sido la prioridad de cualquier empresa, incluso, aquellas que se dicen ser sin ánimo de lucro. Estas también deben garantizar la rentabilidad suficiente que les permita seguir funcionando. Sin embargo, al factor económico se deben incorporar los aspectos sociales y ambientales. Estos tres aspectos son conocidos como las dimensiones de la sostenibilidad empresarial (Martens y Carvalho, 2017). La dimensión económica, se basa en la generación de ingresos a través de la actividad productiva. Esta puede medirse por las utilidades generadas o por la rentabilidad con respecto a un capital invertido. La dimensión social se refiere a las relaciones y el impacto positivo que tiene la empresa en la sociedad o comunidad en la cual se encuentra establecida; va más allá de la responsabilidad social empresarial. Se pretende generar una interacción que favorezca a ambas partes; ya que la sociedad no solo es consumidores, sino que son aliados estratégicos en la permanencia de la empresa a través del tiempo (Abdelkafi y Täuscher, 2016). Una comunidad próspera es un entorno favorable para la existencia de las empresas. De otra parte, la dimensión ambiental se enfoca hacia un comportamiento responsable y amigable con el medio ambiente. Esto se refleja en la disminución de la generación de residuos, productos y empaques biodegradables, explotación razonable de los recursos, empleo de materias primas alternativas con menor impacto sobre los ecosistemas y fabricación de los denominados productos verdes para los llamados mercados verdes (Holden et al., 2016). Se pretende lograr un equilibrio entre estas tres dimensiones y que las empresas transiten y sean gestionadas bajo los parámetros de la sostenibilidad empresarial. Aquellas que no lo hagan estarán expuestas a la pérdida de mercados, a la disminución de sus ingresos y su posible desaparición en el transcurso del tiempo.

Frente a este cambio, no solo empresarial sino cultural (Walrave y Raven, 2016), se han planteado diferentes estrategias algunas de las cuales hacen énfasis en la responsabilidad social empresarial, otras en el uso alternativo de materias primas e insumos que permitan una producción limpia o menos contaminante. También existen empresas que están dispuestas a pagar, como mecanismo de compensación por los residuos y emisiones sobre el medio ambiente, mientras que otras, siguen operando hasta que las normas y los organismos de control lo permitan. De estas alternativas se consideraron las empresas sostenibles como centro de la presente investigación. Sin embargo, el desconocimiento que aún se da sobre la normatividad y las oportunidades que brinda el desarrollo sostenible, contribuyen a que no se avance en esta temática. Sobre el desarrollo sostenible se han planteado diferentes conceptos entre los cuales se encuentra el establecido por la Comisión Mundial sobre Ambiente y Desarrollo, el cual plantea el uso eficiente de los recursos sin afectar la posibilidad de que las futuras generaciones puedan disponer de ellos para garantizar su bienestar; se enfoca en la parte social (Sauvé et al., 2015; Fernández y Gutiérrez; 2013). Es la posibilidad de permanencia en el tiempo con condiciones apropiadas de vida. Esto requiere una adecuada planeación del uso de los recursos en el corto, mediano y largo plazo, y demanda un análisis sobre las amenazas y oportunidades del actuar del ser humano sobre su entorno. El desarrollo sostenible implica la equidad y el respeto por los límites ambientales (Holden et al., 2016).

Relacionado con el concepto general de desarrollo sostenible se encuentra las empresas sostenibles. Son aquellas que han integrado la sostenibilidad empresarial como una estrategia para su desarrollo y permanencia, influyendo positivamente en su comunidad y el medio ambiente (Rajala et al., 2016). Es un reto que implica conocimiento sobre el tema, cambio de mentalidad y métodos de trabajo para lograr su implementación. Las empresas ven el desarrollo sostenible como una política gubernamental que es de obligatorio cumplimiento y se limitan a satisfacer esos requerimientos (Ibarra, 2014) pero si se evidencian las ventajas y beneficios, las empresas podrán incorporarlo como un factor clave de su gestión (Rumeser y Emsley, 2016; Rodrigues et al., 2017). Los sistemas de producción y consumo necesitan cambiar para poder hacer frente a estos desafíos (Walrave y Raven, 2016), los cuales están relacionados con la producción limpia, la protección del medio ambiente, sobrevivencia del ser humano y la generación de valor para las partes interesadas (Abdelkafi y Täuscher, 2016). Estas partes interesadas tienen diferentes niveles de poder e influencia que afectan las políticas de sostenibilidad de la empresa (Ackermann y Eden, 2011) y el nivel de desarrollo o grado de sostenibilidad que puede alcanzar (Dyllick y Muff, 2016).

Los indicadores de la sostenibilidad empresarial se definen con base en las tres dimensiones del desarrollo sostenible y las interacciones entre ellas (Geissdoerfer et al., 2018). Los indicadores económicos se refieren a la rentabilidad de la empresa; los sociales miden el impacto en la comunidad de influencia y los ambientales evalúan los aspectos ecológicos, la utilización de los recursos y los niveles de contaminación. La norma ISO 14031 (ICONTEC, 2016) los clasifica en indicadores de desempeño gerencial e indicadores de desempeño operacional. Los primeros son denominados indicadores de gestión y los segundos, de resultados. De igual manera se hace alusión a los ecoindicadores de desempeño, esta otra forma de llamar a los indicadores de la sostenibilidad empresarial, hacen referencia a lo económico, social y ambiental y, en particular, resaltan este último componente. Los ecoindicadores también son conocidos como indicadores ambientales, de

comportamiento ambiental, de gestión y de la situación ambiental o indicadores de ecoeficiencia (Suck Park y Behera, 2014). Algunos ejemplos de estos indicadores son: Dimensión económica: valor económico generado, costo de la energía consumida y costo del agua utilizada en el proceso. Dimensión ambiental: consumo energético total (Kwh), consumo de agua (m³), emisiones de CO₂ totales, residuos sólidos (Kg). Dimensión social: empleados contratados a tiempo completo y a tiempo parcial. Para incorporar la sostenibilidad como parte de la dinámica de la empresa, además de caracterizar e identificar los indicadores de la sostenibilidad empresarial, se hace necesario establecer cómo evaluar la estructura relacional y el comportamiento de la empresa mediante la modelación y la simulación; que deriven en el planteamiento de acciones de sostenibilidad empresarial (Jaghbeer et al., 2017; Panarotto et al., 2017; Morgan et al., 2017; Plasencia et al., 2018). Para ello, se llevó a cabo una revisión de propuestas de modelamiento de la sostenibilidad empresarial que integran los componentes: empresa, sostenibilidad empresarial y modelo matemático. En el caso de la empresa, el enfoque fue hacia el sector manufacturero, con el fin de hacer énfasis en el proceso de producción. En cuanto a la sostenibilidad empresarial, más que el aspecto conceptual de la responsabilidad social empresarial o ambiental, se buscó cuantificar algunos comportamientos a través de indicadores claves para la empresa. Finalmente, fue de interés encontrar investigaciones que consoliden las propuestas de modelamiento en modelos matemáticos.

La sostenibilidad empresarial, basada en los conceptos del desarrollo sostenible, se ha tratado en diferentes escenarios, pero no se ha desarrollado de manera integrada a un modelo matemático (Plasencia et al., 2018). En algunos casos se enuncia un modelo sostenible, pero solo se realiza una descripción de características importantes relacionadas con la empresa, sin llegar a consolidar un modelo. En otras investigaciones se plantean modelos de la empresa donde se analizan una o varias unidades, pero sin integrar elementos claves de la producción en el proceso de modelamiento. Otras propuestas muestran procesos de modelamiento, haciendo uso de la dinámica de sistemas, las cuales son afines con lo que se plantea en el presente artículo (Ceballos et al., 2013; Poor y Amiri, 2016; Espinoza et al., 2017; Elsayah et al., 2017; Zhang et al., 2017; Zhao et al., 2017 y Williams et al., 2017). Estos planteamientos se aproximan al tema de desarrollo sostenible mediante la formulación y solución de un problema global o específico de la empresa objeto de estudio. También establecen problemáticas con énfasis en el aspecto ambiental como por ejemplo las emisiones contaminantes o generación de residuos. De igual manera, la cadena logística es otro de los temas que se abordan a través de la dinámica de sistemas buscando contribuir al incremento de la productividad y competitividad, pero sin integrar los componentes del desarrollo sostenible, el proceso de manufactura y el modelo matemático (Forrester, 1999; Sterman, 2000; Stefan et al., 2016).

La dinámica de sistemas es una metodología para el modelamiento de sistemas complejos que requieren un análisis exhaustivo de sus componentes y la comprensión global de su funcionamiento (Forrester, 1999; Sterman, 2000; Schaffernicht, 2009; Thompson et al., 2016; Nabavi et al., 2017; Torres et al., 2017). A la dinámica de sistemas también se le considera como una herramienta científica de construcción de modelos de sistemas, los cuales son susceptibles de ser simulados mediante el uso de computadores (Antequera, 2012). Forrester (1999), creador de la Dinámica de Sistemas, explica varios ejemplos de aplicación a la empresa, entre ellos, un modelo de un sistema de producción y características dinámicas de un sistema cliente-productor-empleo. En los años 90 se incorporaron elementos matemáticos y explicaron comportamientos característicos en los modelos denominados arquetipos; los cuales sirven de referencia para identificar, diseñar y analizar modelos (Sterman, 2000). Una aproximación metodológica para el modelamiento organizacional bajo un enfoque de dinámica de sistemas es planteado en Sterman (2000), quien presenta un modelamiento bajo un esquema de análisis por subsistemas. El uso de casos para la comprensión de los conceptos y metodología de la dinámica de sistemas es utilizado por Schaffernicht (2009). Se abordan problemas relacionados con la empresa como, por ejemplo: fijación de precios de los productos, análisis de las utilidades de la empresa, estudio de los costos, la productividad y la demanda. Otros modelos de gestión aplicados a la sostenibilidad son presentados por Barcellos de Paula (2010) quien plantea la gestión sostenible como una actividad integradora en la empresa. Hace referencia a la teoría de los efectos olvidados la cual expone un modelo de naturaleza secuencial al cual se le pueden incorporar las relaciones de causalidad y la selección de objetivos. En la industria minera también se destacan algunos ejemplos en los cuales integran la responsabilidad social en la gestión empresarial (Maffini et al., 2014).

En García (2017) se plantean algunos modelos en el entorno de la gestión empresarial haciendo uso de la dinámica de sistemas, los cuales trabajan áreas de la empresa, como, por ejemplo: la gestión de existencias, control de calidad, emisiones de CO₂ y un modelo de empresa innovadora. Se realiza el modelamiento y la simulación, pero no se llega al análisis del modelo matemático que permita una evaluación adicional del fenómeno modelado. La empresa textil también ha sido objeto de modelamiento desde el punto de vista de la dinámica de sistemas. Uno de esos casos es expuesto por Gómez y Gómez (2013), quien presenta un modelo basado en la gestión de la producción, aplicando los conceptos de sistema, subsistemas, diagramas causales, variables de flujos y variables de niveles. Se construye el modelo y se simulan sus comportamientos, pero sin entrar a la estructura matemática o construcción del modelo matemático basado en las ecuaciones diferenciales.

The Viable System Model en Panagiotakopoulos et al., (2016) contiene el planteamiento de un modelo empresarial integrando la sostenibilidad empresarial, basado en los lineamientos de la ISO 26000. El modelo está compuesto por varios subsistemas, incluyendo factores externos e internos. El modelamiento mediante dinámica de sistemas tiene aplicaciones en diferentes ámbitos y, claramente, posee un potencial de contribuir a caminos más sostenibles para el desarrollo (Nabavi et al., 2017 y Torres et al., 2017). Por lo tanto, se vincula a la presente investigación como un componente importante en el desarrollo de la misma, al igual que los sistemas dinámicos, los cuales se definen como modelos matemáticos de un proceso o fenómeno que evoluciona con el tiempo y que tienen gran aplicación en fenómenos físicos y biológicos (Kuznetsov, 2004). Precisamente, un modelamiento para la evaluación de la sostenibilidad en la cadena de suministro del biotecnológico donde incorpora elementos de la dinámica de sistemas y sistemas dinámicos es desarrollado en (Ibarra, 2018). De acuerdo con lo anterior, con respecto a la empresa sostenible y la sostenibilidad empresarial hay variada literatura sobre ellos. Sin embargo, los trabajos encontrados se enfocan en áreas específicas como almacenamiento, distribución, producción, áreas de mercadeo, innovación, análisis de contaminación, entre otros. En algunos casos, se modela la empresa, pero generalmente, no se integra el componente de sostenibilidad, y cuando se hace, no realiza la modelación matemática. Esta última permite caracterizar cuantitativamente la estructura y los componentes del modelo, así como estimar el comportamiento de las principales variables.

El objetivo de la presente investigación es la de establecer una metodología para el modelado de algunos aspectos asociados a la sostenibilidad empresarial y su aplicación en una empresa manufacturera. Tiene como hipótesis: a) La visión sistémica de la empresa permite conocer el comportamiento de variables claves de la organización. b) La metodología planteada permite evaluar el comportamiento sistémico de la empresa. Entre las preguntas que se desean resolver están: ¿Cómo se comportan las órdenes de producción con respecto a los niveles reales de fabricación? ¿Qué tendencia tienen las pérdidas de producción? ¿Cuáles es el comportamiento de los residuos generados? ¿Cómo se comportan los inventarios de productos terminados? En el planteamiento metodológico desarrollado se abordan los conceptos relacionados con el desarrollo sostenible, la empresa sostenible, los indicadores de sostenibilidad empresarial, el modelamiento, la gestión por procesos, la dinámica de sistemas y los sistemas dinámicos. El enfoque de las empresas hacia la sostenibilidad empresarial es una oportunidad para hacer el planteamiento de la presente propuesta de modelamiento, que podrá servir de referencia para futuros análisis y aplicaciones en empresas del mismo o diferente sector, ya que su estructura y complejidad, se diseñaron de tal forma que sirva de base para otras empresas.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta comprende las siguientes fases: propuesta preliminar y plan de trabajo, diagrama causal, construcción del modelo funcional, simulación del modelo, análisis de sensibilidad, construcción del modelo de sistemas dinámicos, simulación del modelo dinámico, modelos alternos e informe final de resultados. Cada una de estas fases se presenta a continuación.

Propuesta preliminar y plan de trabajo. La metodología desarrollada inicia con la selección de la temática de interés o el problema global hacia la cual se orienta el investigador (Figura 1). En este caso, el tema es la sostenibilidad empresarial. Para ello se realiza una revisión bibliográfica especializada sobre los tópicos específicos de la investigación, a partir de la cual se logra construir los fundamentos y argumentos necesarios para comprender el tema objeto de estudio.

En este planteamiento metodológico se distingue una primera parte que corresponde a la fundamentación teórica relacionada con el desarrollo sostenible, la empresa sostenible, los indicadores de sostenibilidad empresarial, el modelamiento, la dinámica de sistemas y los sistemas dinámicos. Dentro de este mismo proceso de soporte teórico, se investigó acerca de modelos relacionados con la sostenibilidad empresarial, que vincularan los aspectos propios de la empresa, con la sostenibilidad y la construcción matemática. En la revisión realizada, no se encontró un modelo que integrara estos aspectos, siendo los más afines, aquellos donde se trabaja la dinámica de sistemas. Es por ello que la dinámica de sistemas es la metodología base en el proceso metodológico y de desarrollo de la investigación.

En un segundo momento se define el sector de interés sobre el cual se va a orientar el modelamiento, ya que la sostenibilidad empresarial se puede estudiar para cualquier tipo de empresa. En este caso se seleccionó el sector manufacturero con el fin de tener en cuenta el proceso productivo como el eje articulador a partir del cual se desarrolla el modelamiento del sistema. Una vez definido el sector se busca una empresa que esté dispuesta a colaborar con el suministro de la información y retroalimentar el proceso de construcción del modelo, análisis y planteamiento de soluciones. Con los expertos de la empresa se evalúa el problema de sostenibilidad fundamental al interior de la empresa y se plantea el proyecto que sirva como eje orientador

para el modelamiento del sistema. Esto permite definir los objetivos, el plan de trabajo y una primera aproximación a la manera en que se abordará la construcción del modelo.

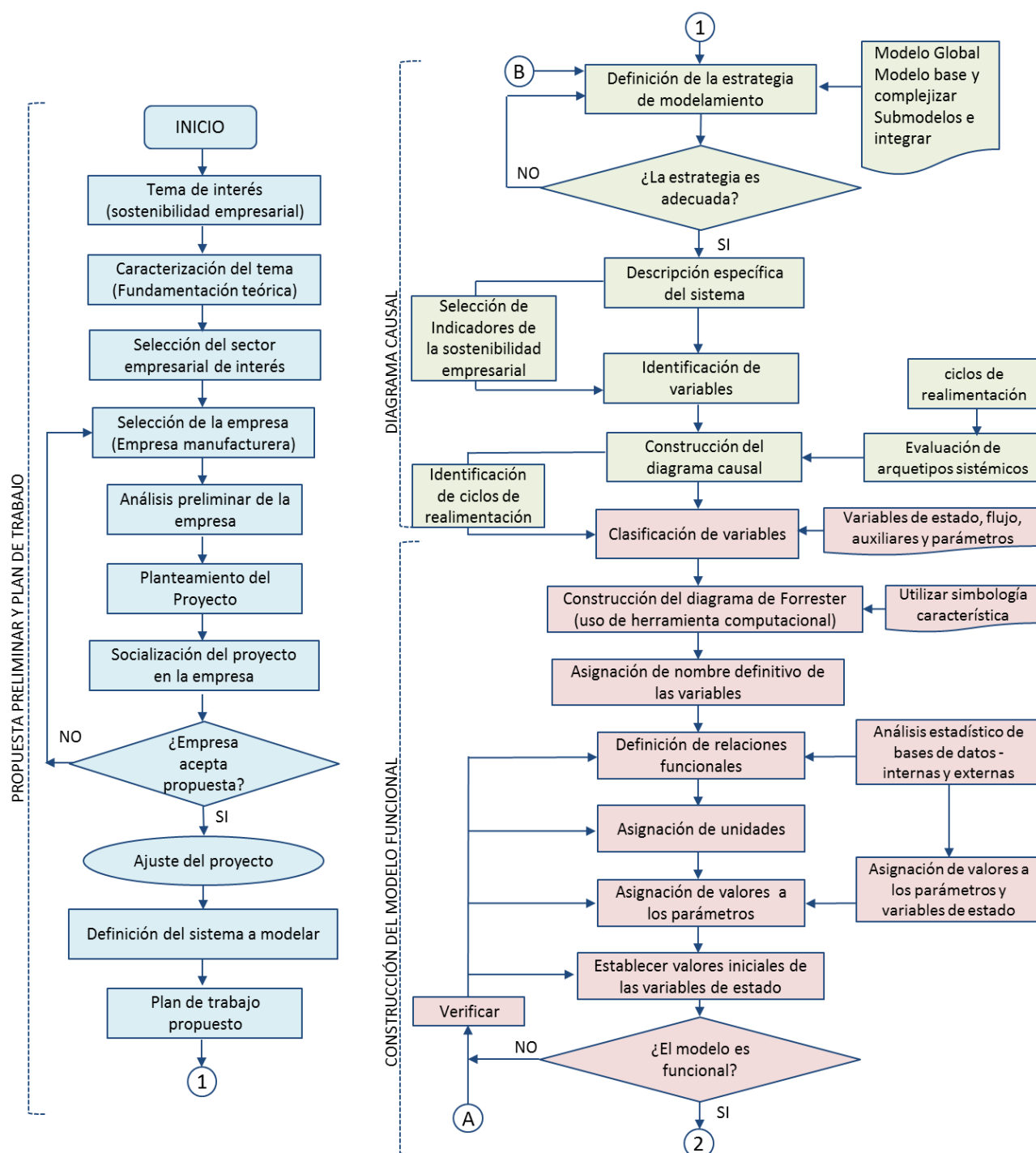


Fig. 1: Metodología para el modelamiento de la sostenibilidad empresarial. Fases de propuesta y plan de trabajo, diagrama causal y modelo funcional

Diagrama causal. El análisis de la empresa, la información suministrada y la interacción con los representantes de la organización, permiten comprender la estructura y sus relaciones, tanto en su parte cualitativa, como en la cuantificación de dichas relaciones y la definición de valores de referencia, de una forma coherente y estructurada, para los parámetros identificados. A partir de allí se define la estrategia de modelación la cual puede iniciar con un modelo global el cual se va especificando, un modelo simple de un área estratégica de la empresa el cual irá ganando complejidad con la incorporación de los demás elementos o la construcción de submodelos que se integran en el modelo del sistema principal.

En cualquiera de estos casos, se tendrá presente el enfoque sistémico propio de la dinámica de sistemas. Esta fase se consolida en la construcción del diagrama causal, en el cual quedan identificadas las variables de interés y sus relaciones de causalidad. De igual manera, se identifican ciclos de realimentación y se logra una mejor comprensión del sistema y el problema objetos de análisis.

Construcción del modelo funcional. A partir del diagrama causal e incorporando la clasificación de las variables en: variables de estado, variables de flujo, variables auxiliares y parámetros; se elabora el diagrama de flujos y niveles (diagrama de Forrester), el cual es un modelo funcional en la medida que represente el sistema y el problema estudiados. Al construir el diagrama de Forrester internamente el programa, en este caso el software Vensim, establece las ecuaciones para las variables de estado a partir de las variables de flujo, además, se complementan con los valores iniciales. Las ecuaciones para las demás variables se construyen con base en las relaciones establecidas con otras variables, parámetros y valores constantes o aleatorios, establecidos a partir de la información proveniente de base de datos, información estadística, estudio de casos similares y análisis de los expertos. En esta fase se verifica si el modelo es funcional, es decir, si simula, de lo contrario, se deben hacer los ajustes según el problema detectado.

Simulación del modelo. A medida que se avanza en cada una de estas etapas se debe dar la socialización en la empresa y recibir la respectiva retroalimentación con el fin de ir ajustando el modelo. Este ajuste se verifica desde el punto de vista de la estructura y su comportamiento (Figura 2). En cuanto a lo primero, se evalúan en el modelo las relaciones definidas entre las variables, los ciclos que se forman y la coherencia de las unidades; el mismo software facilita esta tarea mediante un chequeo de coherencia y unidades utilizadas. Con respecto al comportamiento, este se evalúa a través de la simulación.

Mediante la simulación preliminar del modelo se revisa la consistencia y evolución de las variables a través del tiempo y los resultados iniciales que se obtienen. Estos resultados deben ser coherentes con el comportamiento de la situación real. Se verifica con respecto a los registros numéricos y gráficos y el análisis de los expertos. De acuerdo con estas verificaciones se ajusta el modelo de tal forma que se logre coherencia estructural y funcional. A continuación, se lleva a cabo la simulación para lo cual se define previamente la cantidad de ciclos a ejecutar y el periodo de tiempo a simular con base en los objetivos planteados para la investigación. De igual manera, se seleccionan las variables y los escenarios que serán objeto de análisis.

Análisis de sensibilidad. En la simulación también se hacen modificaciones a los parámetros, a las condiciones iniciales o a algunas relaciones entre variables que sean de interés para el estudio, todo ello dentro de lo que se conoce como análisis de sensibilidad. Estos resultados también son objeto de análisis e interpretación. Es importante tener en cuenta que el modelo continuamente se está ajustando según los resultados obtenidos, los requisitos planteados y objetivos definidos. Se obtienen las conclusiones y recomendaciones con base en los resultados observados. Hasta esta parte es lo que se trabaja con dinámica de sistemas, sin embargo, en el presente artículo, se continúa con la construcción del modelo matemático y su análisis desde el punto de vista de los sistemas dinámicos.

Construcción del modelo de sistemas dinámicos. La obtención del modelo matemático general de ecuaciones diferenciales parte de la codificación de las variables y parámetros con el fin de facilitar el manejo de las operaciones algebraicas. Para cada una de estas variables se construyen las ecuaciones diferenciales. Se inicia con las ecuaciones de las variables de estado, las cuales se construyen a partir de las ecuaciones de las variables de flujo y, estas, a su vez, de las variables auxiliares y los parámetros, conforme a las relaciones e interrelaciones graficadas en el diagrama de Forrester. El modelo matemático general se simplifica mediante operaciones algebraicas y, si es necesario, se recodifican algunas variables, para llegar a un modelo formal en términos del lenguaje y simbología matemática. Para la simulación de este modelo se hace una nueva definición de valores iniciales según la nueva codificación, se establece el método de simulación y se hace uso de un software o se construye el algoritmo de simulación. Se puede optar por una solución analítica, aunque generalmente es poco probable debido a la complejidad de los problemas abordados y de las ecuaciones que se generan a partir de estos mismos problemas.

Simulación del modelo dinámico. En la simulación, mediante el software MATLAB (2017), se obtienen los resultados de tipo gráfico relacionados con diagramas de fase, diagramas de bifurcaciones y puntos de equilibrio, según lo planteado para el modelo analizado (Figura 3). Estos resultados se comparan y complementan con los obtenidos en el modelado y simulación mediante Dinámica de Sistemas. Se consolidan y se establecen las acciones de sostenibilidad empresarial, junto con las conclusiones y recomendaciones.

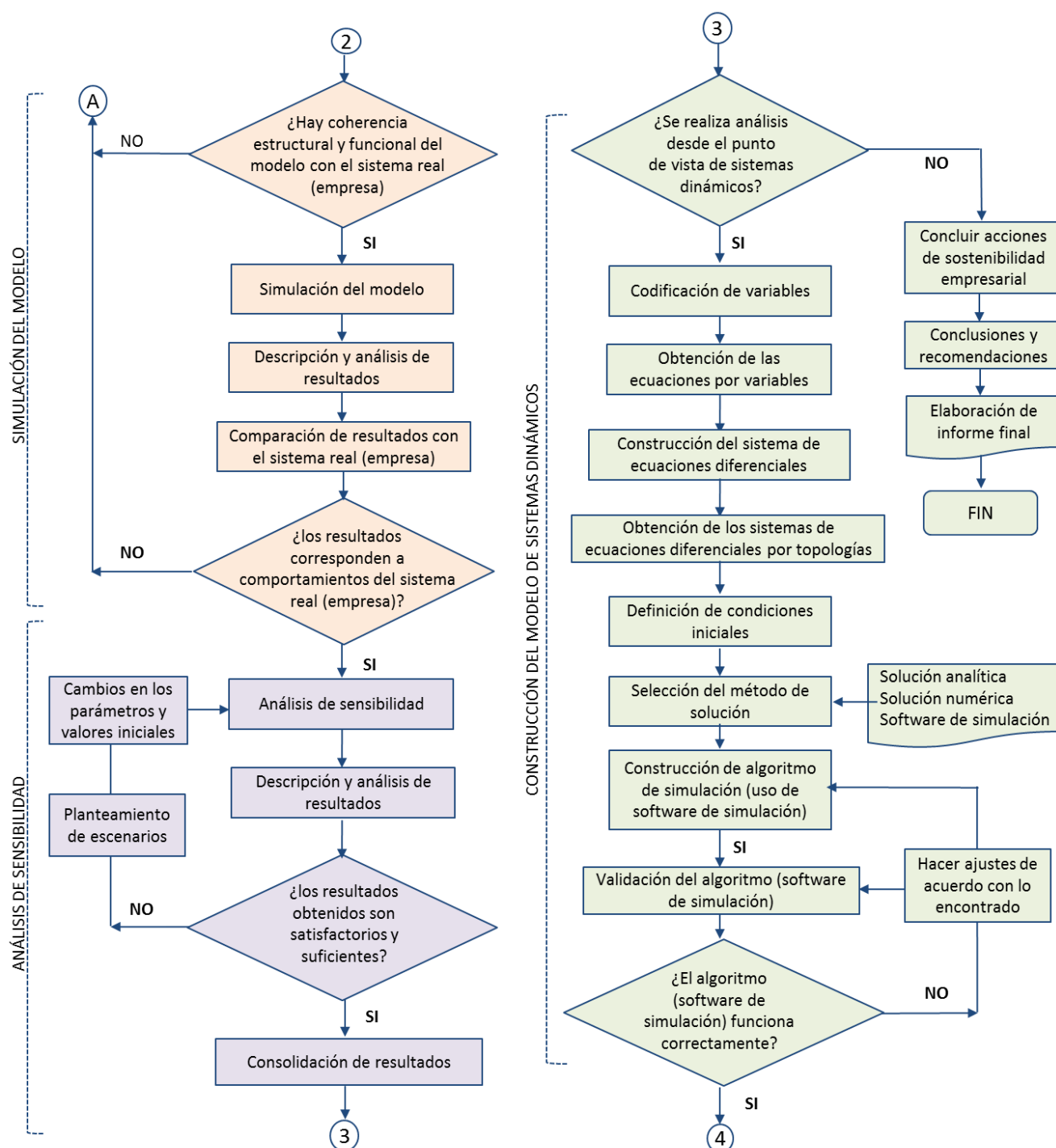


Fig. 2: Metodología para el modelamiento de la sostenibilidad empresarial. Fases de simulación del modelo, análisis de sensibilidad y construcción del modelo desde el punto de vista de sistemas dinámicos

Modelos alternos. Otro aspecto de interés es el planteamiento y construcción de modelos alternos cuando se requiere explorar otras posibilidades en cuanto a la estructura del sistema. Es diferente al análisis de sensibilidad ya que en este se evalúa el comportamiento a partir de modificaciones en los parámetros. Los resultados obtenidos en los modelos se comparan y se pueden obtener conclusiones, por ejemplo, en cuanto a si la complejidad del modelo cambia significativamente o no los resultados.

Informe final de resultados. Consolidación escrita del proceso desarrollado; es la memoria técnica del trabajo realizado, sus diferentes etapas, las interacciones con la empresa y el registro de las acciones de sostenibilidad planteadas a partir de los resultados obtenidos y definidas por el equipo directivo y técnico de la empresa. Es importante dejar evidencia de las novedades y experiencias durante el desarrollo del proyecto, ya que ellas son la base para la evaluación y retroalimentación del proyecto presentado. Además, permitirá contrastar en el futuro algunos de los resultados obtenidos y su impacto en la evolución de la empresa.

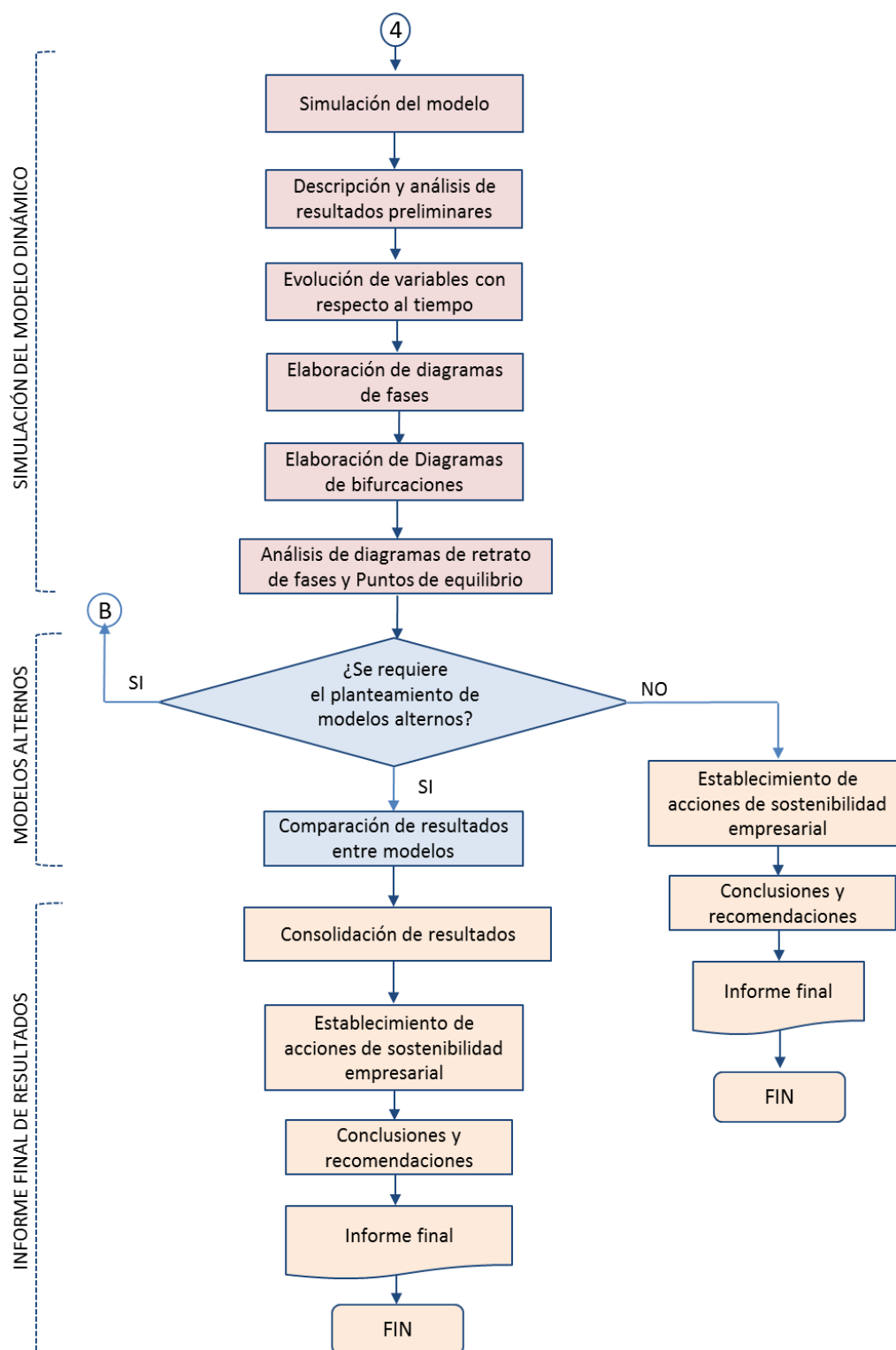


Fig. 3: Metodología para el modelamiento de la sostenibilidad empresarial. Fases de simulación del modelo dinámico, modelos alternos e informe final

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UNA EMPRESA MANUFACTURERA

En este aparte se presenta el desarrollo de la metodología para una empresa colombiana fabricante de electrodomésticos, de carácter nacional, ubicada en Manizales, en el Departamento de Caldas, la cual tienen producción promedio de 39000 unidades por mes y 350 operarios de planta. Sus productos son para la venta en el mercado nacional e internacional. Como se indicó en la descripción de la metodología general, el marco conceptual sobre el desarrollo sostenible, la sostenibilidad empresarial, indicadores de gestión, modelamiento, dinámica de sistemas y sistemas dinámicos fundamentan la identificación de los objetivos, el análisis, el desarrollo y comprensión del problema objeto de estudio. Posteriormente el conocimiento de la

empresa, su organización, funcionamiento, la caracterización de las principales variables y la priorización de problemas; permitieron la aplicación de la metodología propuesta tomando como eje articulador del modelo el proceso productivo. Los aspectos de la fundamentación teórica ya fueron tratados en el apartado de la introducción, por lo tanto, se inicia directamente con la descripción del proceso productivo como elemento base para el modelamiento

Descripción del proceso productivo. El proceso de producción de la empresa se inicia a partir de las órdenes de producción, las cuales, dependen del comportamiento de la demanda de sus productos en el mercado. Mensualmente se planea la producción la cual se basa en las órdenes de producción y las condiciones propias de funcionamiento de la empresa tales como: los niveles de productividad, los porcentajes de generación de residuos, el margen de productos defectuosos estimado, el cubrimiento de productos por garantía, el personal disponible, la política de manejo de inventarios, la capacidad de almacenamiento y los volúmenes de despacho. Una vez planeada y aprobada la orden de producción se hace la solicitud de materias primas al almacén y a los proveedores, ya que la empresa funciona con contratistas bajo la modalidad de maquilas y tercerización con el enfoque de justo a tiempo. La empresa lleva a cabo las operaciones esenciales para la fabricación del producto y ensambla las piezas que son suministradas por los subcontratistas bajo la metodología Kanban. Esto se logra mediante una comunicación permanente y oportuna, que exige a los contratistas disponer de la cantidad suficiente de partes y componentes en inventario que garanticen el normal funcionamiento de la empresa.

La cantidad de materias primas requeridas debe ser suficiente para fabricar el número de productos requeridos en cada orden de producción teniendo en cuentas las pérdidas que se puedan presentar en las materias primas, los productos en proceso, los productos terminados y los productos en garantía. Aunque se maneja el justo a tiempo, la empresa requiere tener disponibles materias primas esenciales para garantizar, al menos, tres meses de producción, con base en un inventario estándar. Este inventario es un valor de referencia para el ajuste del inventario real, el cual se afecta por las fluctuaciones en las órdenes de producción. En la producción se realiza la transformación de materias primas en productos terminados. Los niveles de producción se ven afectados por productos en proceso y productos terminados defectuosos, la capacidad de desempeño de los operarios y la velocidad de fabricación. Los productos manufacturados siguen a un inventario de productos terminados donde se tiene una capacidad máxima de almacenamiento, un tiempo máximo de permanencia y un volumen de despacho de productos. Este último determina la dinámica de este inventario, en cuanto a su nivel de rotación. En cuanto a la parte económica, se tiene un costo de producción que comprende las materias primas, los empleados, la administración y los costos por partes o productos defectuosos.

Diagrama Causal. Con base en la información recolectada, el análisis de registros estadísticos y comunicación con expertos de la empresa (gerente de la empresa, jefe de producción, ingeniero de calidad e ingeniero de campo) se construye el diagrama causal (Figura 4). Después de varios planteamientos se define vincular los indicadores de consumo energético, generación de residuos sólidos, contratación de personal y utilidad. Estos representan cada una de las tres dimensiones de la sostenibilidad empresarial: ambiental, social y económica. Se observa en el diagrama causal la relación entre las diferentes variables identificadas aún sin clasificar, ya que lo que interesa en este caso, es el establecer causas y efectos. Se destacan los ciclos de realimentación relacionados con la gestión del talento humano (productividad, capacitación, productividad, trabajadores a contratar, creación de empleos parciales e inversión de capacitación y el de ahorro energético. En el primero se establece que a mayor capacitación mejora la productividad y al mejorar esta, se deberán contratar menos cantidad de trabajadores, lo cual favorece las condiciones de competitividad de la empresa. En el segundo ciclo, la empresa tiene un consumo energético que está directamente relacionado con los niveles de producción, pero también depende de la incorporación de nuevas tecnologías de ahorro energético y la capacitación de los trabajadores. Operarios mejor capacitados y calificados tendrán mejor desempeño, lo que aumenta la productividad, reducción de desperdicios, menor cantidad de productos defectuosos. Todo esto contribuye a un uso más eficiente de la energía utilizada en el proceso productivo.

Construcción del modelo funcional. Con base en el diagrama causal se construye el diagrama de flujos y niveles o diagrama de Forrester. Para ello, se ajusta el nombre de algunas variables, se adicionan otras y se clasifican en variables de estado, variables de flujo, variables auxiliares y parámetros. Las variables de estado (Tabla 1) son aquellas que caracterizan el sistema en un momento o tiempo determinado. Son acumulaciones o inventarios; reflejan una demora en el flujo del material o de información. Son importantes para identificar la evolución del sistema. Las variables de estado tienen asociadas al menos una variable de flujo que puede ser de entrada o de salida que determinan la acumulación o disminución de la variable de estado.

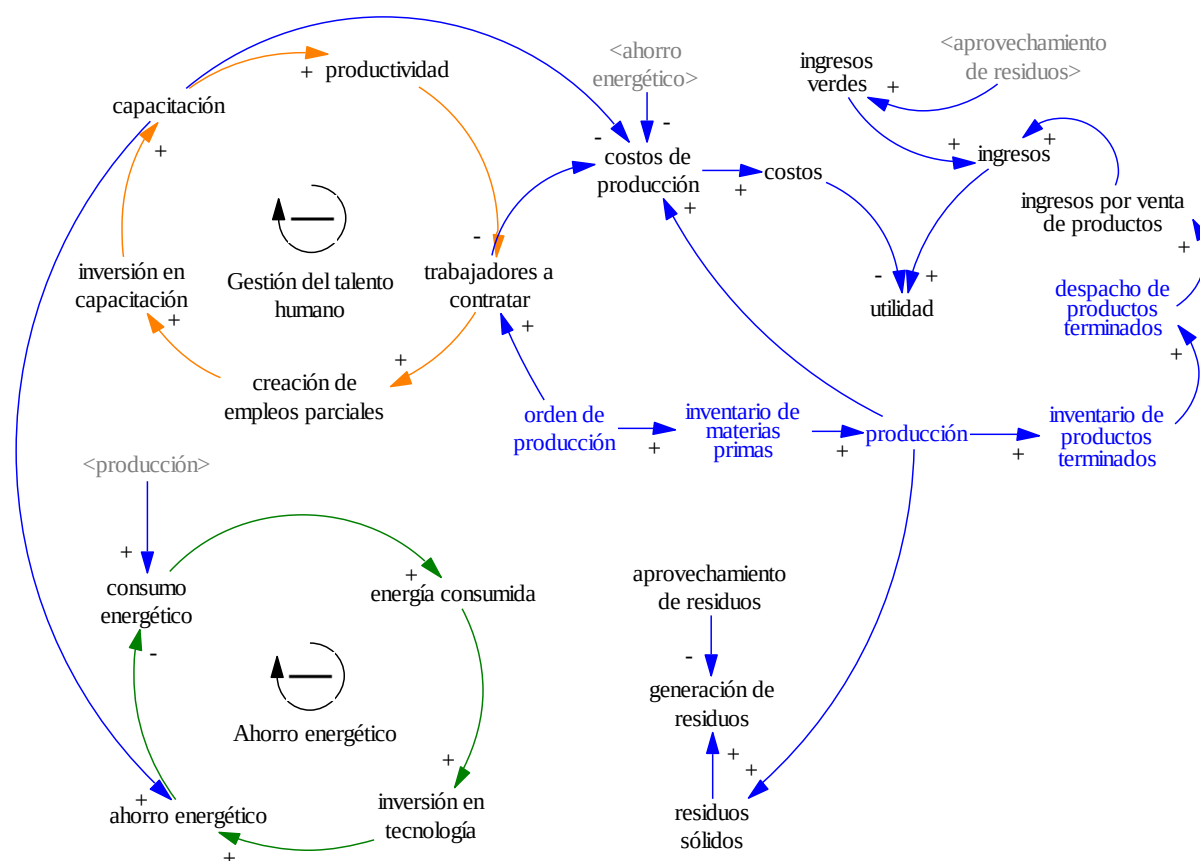


Fig. 4: Diagrama causal de la empresa objeto de estudio.

Tabla 1: Definición de variables de estado para la empresa

Nombre variable	Unidades	Código	Nombre variable	Unidades	Código
energía consumida	kwh	EC	número de empleos parciales de producción	empleados	NEP
residuos sólidos (kg)	kg	RS	inventario de productos terminados	unidad	IPT

Las variables de flujo (Tabla 2) se comportan como las tasas del sistema, que regulan el paso de la información y de los materiales. Se encuentran asociadas a las variables de estado. Las variables auxiliares (Tabla 3) son variables intermedias que afectan las variables de flujo o a otras variables auxiliares. También pueden estar relacionadas con variables de estado y parámetros que alimentan el sistema. Los parámetros (Tabla 4) son valores constantes o que varían en períodos de tiempo del largo plazo. Por lo tanto, permanecen estables durante dichos períodos de tiempo. Los parámetros se relacionan con variables auxiliares y variables de flujo, pero no son recibidos influencia de otras variables. Durante el análisis del modelo los parámetros son variados con el fin de evaluar el comportamiento del modelo.

Tabla 2: Definición de variables de flujo para la empresa

Nombre variable	Unidades	Código	Nombre variable	Unidades	Código
despacho productos terminados	unidad/mes	DPT	generación de residuos sólidos	kg/mes	GRS
consumo de energía	kwh/mes	CE	producción	unidad/mes	PPE
creación de puestos de trabajo para producción	Empleados/mes	CPT	reducción puestos de trabajo para producción	empleados/mes	RPT
aprovechamiento	kg/mes	AP			

Para la construcción del modelo (Figura 5) se evaluaron diferentes alternativas, entre ellas, la de construir una sola estructura donde estuvieran integradas las diferentes dimensiones de la sostenibilidad empresarial: Social, económica y ambiental. Sin embargo, no fue muy apropiado, por las dificultades de comprensión y no claridad de la incorporación de los tres componentes. Se había constituido, básicamente, en un modelo de

tipo ambiental, sin dar fuerza al componente empresarial. También se planteó el desarrollo de una estructura base, que permitiera la incorporación de módulos específicos, pero no se logró la flexibilidad suficiente para incorporar módulos representativos de cada una de las áreas. Finalmente, se diseñó una estructura (Figura 5) donde se modela el proceso de manufactura asociado a los costos y factores técnicos que corresponden al componente físico y económico del proceso productivo. De igual manera se incorporan los factores de ahorro energético, gestión del talento humano y la generación de residuos con sus correspondientes ingresos verdes. De esta forma se integran los indicadores de tipo ambiental, económico y social, donde se corresponde con al menos un indicador de la triada del desarrollo sostenible.

Tabla 3: Definición de variables de auxiliares para la empresa

<i>Nombre variable</i>	<i>Unidades</i>	<i>Código</i>	<i>Nombre variable</i>	<i>Unidades</i>	<i>Código</i>
capacitación	adimensional	C	ingresos verdes	pesos/mes	IV
costo empleados de planta	pesos/mes	CEP	motivación para invertir en capacitación	adimensional	MC
costo de empleados variables	pesos/mes	CEV	motivación para invertir en tecnología ahorradora	adimensional	MIT
costo fijo planta y admon	pesos/mes	CFP	orden de producción	unidad/mes	OP
costo materias primas	pesos/mes	CMP	pérdidas materias primas	pesos/mes	PM
costos de producción	pesos/mes	CP	pérdidas de producción	pesos/mes	PP
costo total	pesos/mes	CT	pérdidas totales	pesos/mes	PT
factor de ahorro	adimensional	FA	utilidad	pesos	U
factor de costo de producir una unidad	pesos/unidad	FCU	recepción materias primas	unidad/mes	RMP
factor de pérdidas de m.p.	adimensional	FPM	tecnología para la reducción del consumo	adimensional	TRC
factor de pérdidas de producción	adimensional	FPP	productividad personal de planta	unidad/mes	PPP
Ingresos totales	pesos/mes	IT			

Tabla 4: Definición de parámetros para la empresa

<i>Nombre variable</i>	<i>Unidades</i>	<i>Código</i>	<i>Nombre variable</i>	<i>Unidades</i>	<i>Código</i>
número de unidades por contratista al mes	unidad/(mes) (empleados)	NUC	número empleados fijos de producción	empleados	NEF
factor que relaciona capacitación y productividad	adimensional	FCP	unidades por empleado de planta	unidad/(mes) (empleados)	NUP
consumo energético por unidad	kwh/unidad	CEU	pérdidas implícitas de mano de obra	adimensional	PIM
costo materias primas por unidad	pesos/unidad	CMU	pérdidas implícitas del proceso	adimensional	PIP
costo promedio por empleado	pesos/(empleo) (mes)	CPE	precio por kg. de residuo dispuesto	pesos/kg	PR
precio unidad de producción	pesos/unidad	PU	costo de planta	pesos/mes	CPL
factor de ahorro energético de la tecnología	adimensional	FAT	retardo en el tiempo de pago	mes	RTP
tiempo de contrato	mes	TC	tasa de aprovechamiento	1/mes	TA
factor de aumento por pasar el límite de producción	adimensional	FAL	tiempo promedio inventario	mes	TPI
costo energético kwh	pesos/kwh	CEK	tasa pérdida material	adimensional	TPM
factor de generación de residuos	adimensional	FGR	tasa de creación de puestos de trabajo	1/mes	TCP
Kg residuos sólidos por producto	kg/unidad	KRP	factor de aporte de la capacitación en el ahorro	adimensional	FAC
meta de consumo de energía	kwh	MCE	valor límite de producción	Unidad/mes	VLP
costos de administración	pesos/mes	CA			

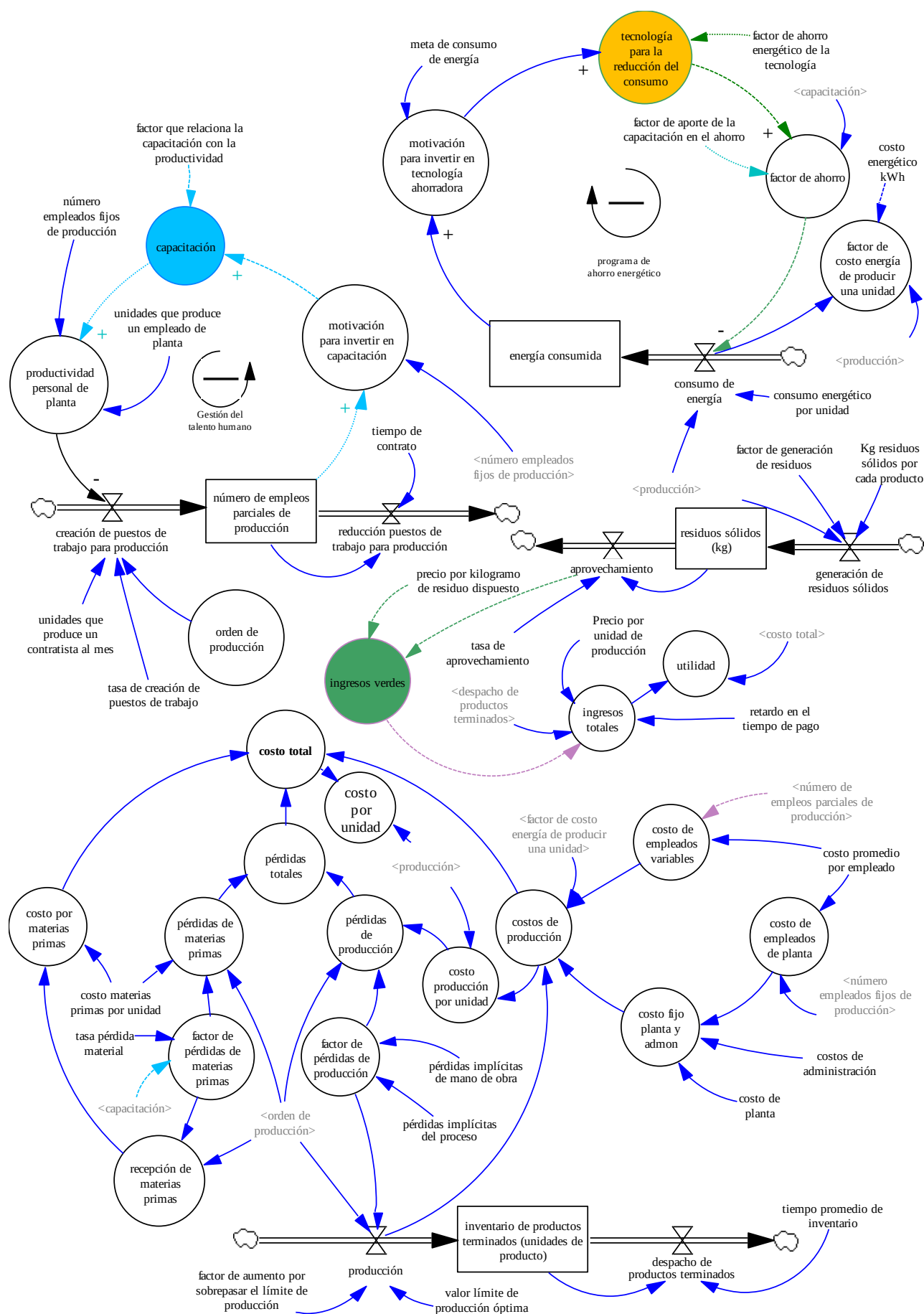


Fig. 5: Modelo de la empresa objeto de estudio - Diagrama de Forrester

Simulación del modelo. El modelo fue objeto de análisis en cuanto a estructura y comportamiento, siendo coherente con la empresa de referencia, guardando las proporciones de los datos con que fue alimentado el sistema. El modelo a su vez, fue analizado teniendo como información base de entrada, órdenes de producción variables. Una vez construido el modelo y verificado que satisface la estructura de sistema modelado, se realiza la simulación, destacando los resultados que se presenta a continuación. Se observa en la Figura 6 que la producción comparada con la orden de producción es menor, esto debido a las pérdidas que se generan en el proceso de transformación de las materias primas en productos terminados. La orden de producción debe satisfacer la cantidad de productos requeridos más los imprevistos que se presentan en el proceso productivo.

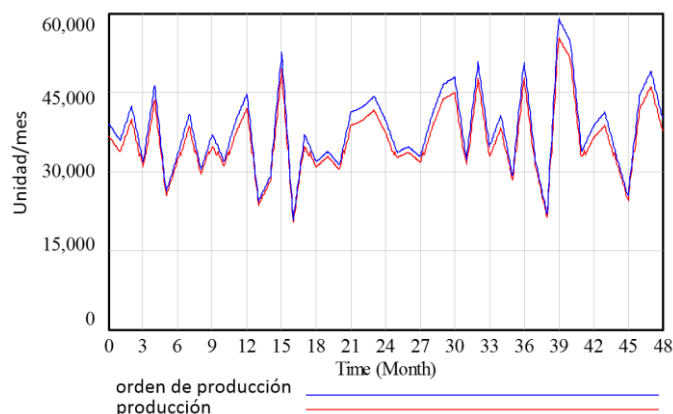


Fig. 6: Orden de producción comparada frente a la producción

Lo anterior se verifica cuando se evalúan las pérdidas de producción (Figura 7) en la cual se observa una tendencia a través del tiempo. Cuando en la empresa se supera el valor estándar de producción, el cual está alrededor de 35 mil unidades, la empresa incrementa los turnos de trabajo, establece horas extras, contrata más personal, agiliza el ritmo de producción; estos factores contribuyen a que se presenten algunos imprevistos y fallas que afectan los niveles de productividad. Al evaluar el consumo de energía (Figura 8) se encuentra que esta se acumula a través del tiempo. El nivel de tendencia de esta acumulación puede reducirse si se establecen cambios en la tecnología de ahorro energético y el uso de fuentes de energía diferentes a la eléctrica.

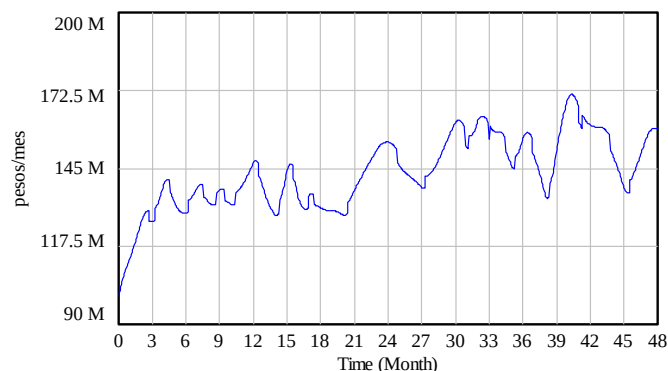
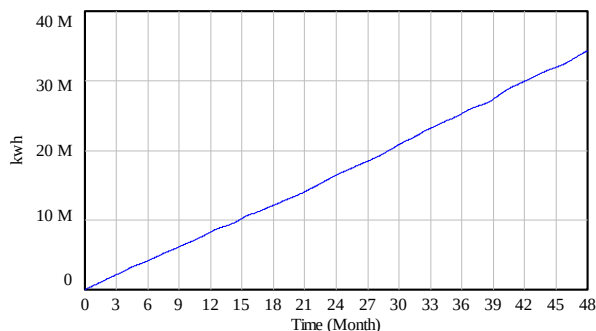
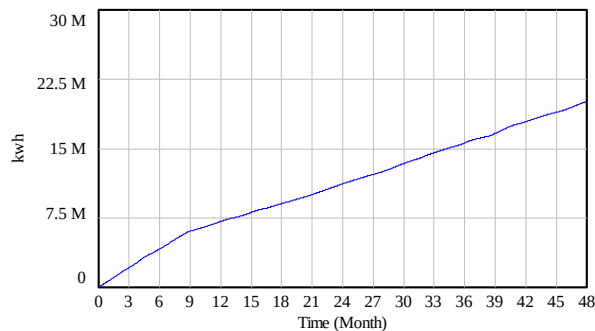


Fig. 7: Pérdidas de producción



a. Energía consumida en la empresa sin ahorro energético



b. Energía consumida en la empresa con incorporación de medidas de ahorro energético

Fig. 8: Energía consumida en la empresa sin ahorro y con incorporación de medidas de ahorro energético

En la Figura 9 se muestra que cuando se aplican estas medidas de ahorro la tendencia creciente cambia a partir del periodo 9 lo que hace que la pendiente de creciente sea menos pronunciada, lo que hace que se tenga un menor consumo a través del tiempo. La generación de residuos sólidos en el proceso de productivo varía de acuerdo con los niveles de producción, la productividad y la eficiencia en el uso de los recursos, sin embargo, el porcentaje de recuperación de residuos depende de las características de los mismos y la efectividad en su recuperación. Esto a su vez incide en los ingresos verdes que se puedan obtener por venta a terceros. En la Figura 9 se visualiza variaciones en los ingresos obtenidos por la venta de residuos comprendida entre 9 y 14 millones mensuales, sin comportamientos o tendencias generales.

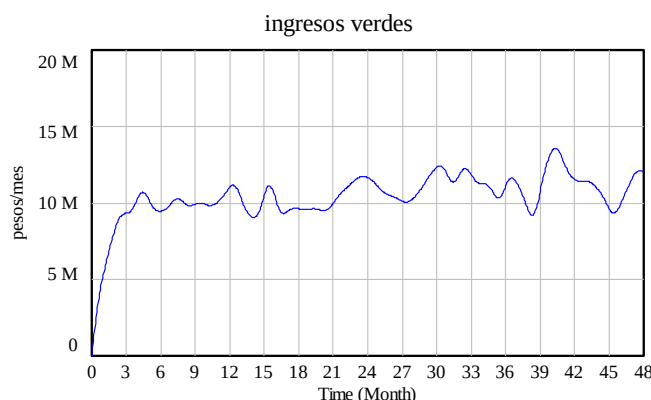


Fig. 9: Ingresos verdes por venta de residuos generados en el proceso de producción

Finalmente, con respecto a la generación de empleos parciales de producción, en la Figura 10 se muestra una tendencia creciente. Esto significa que los empleos temporales, en algunos momentos llegan a triplicar al número de trabajadores fijos o de planta. Esta situación está relacionada con la variabilidad de la demanda lo que causa que la contratación y retiro de trabajadores esté sujeta a las necesidades de producción de la empresa. La empresa no puede tener una nómina fija alta porque estaría asumiendo una carga laboral onerosa que afectaría su viabilidad económica frente a la incertidumbre de la demanda.

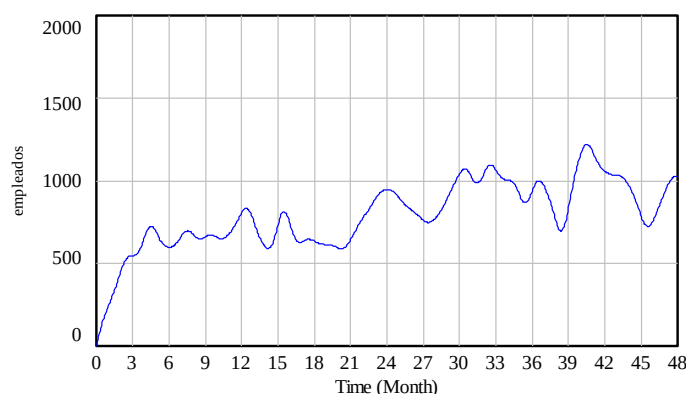


Fig. 10: Número de empleos parciales creados para el área de producción

Análisis de sensibilidad. Se realizó a partir de los cambios planteados para los siguientes parámetros: factor de ahorro energético de la tecnología, costo materias primas por unidad de producción y número inicial de unidades que produce un empleado de planta. Para el factor de ahorro energético de la tecnología se estableció un rango comprendido entre 0 y 1, y se consideró una distribución uniforme para los valores en este rango: el valor 0 significa que no se tiene ahorro energético y 1 cuando se aplica el máximo ahorro posible. El número inicial de unidades que produce un empleado de planta corresponde a un valor promedio de 65, con un rango entre 60 y 70 unidades y una desviación estándar de 3 unidades. En este caso, los datos de producción de unidades corresponden a una distribución normal, teniendo en cuenta que la producción global sigue este tipo de distribución. De igual manera, el valor histórico para un operario de planta calificado es de 65 unidades/mes, lo cual es coherente con los valores planteados.

En la Figura 11 se observa incertidumbre en la variable energía consumida, la cual está reflejada por el factor de ahorro energético de la tecnología. El límite inferior permanece en un valor constante de 7 millones de kwh si la empresa utiliza una fuente de energía complementaria a la energía eléctrica, de lo contrario el consumo crece de manera constante.

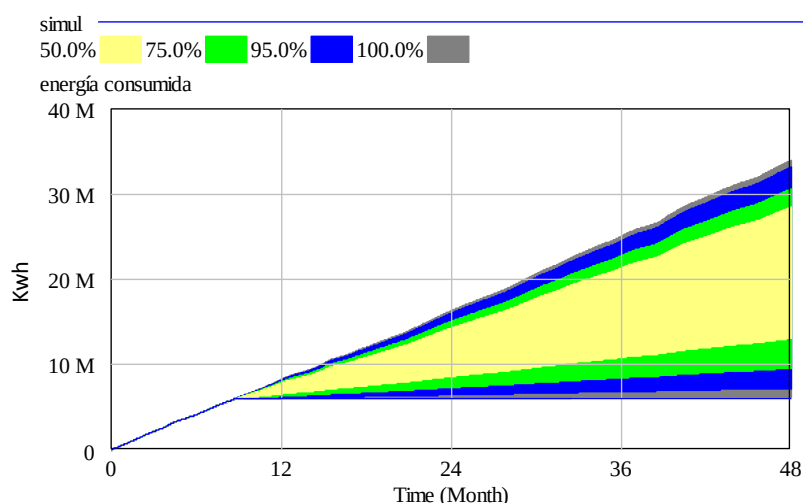


Fig. 11: Análisis de sensibilidad de la energía consumida

Con respecto al número de empleos parciales de producción (Figura 12), se observa menos incertidumbre que en la variable energía. Sin embargo, a medida que transcurre el tiempo, se presenta una tendencia creciente de la variable, situación que debe ser tenida en cuenta por la empresa. Una de las alternativas que se puede considerar es la de plantear periodos de contratación más largos, lo que, a su vez, favorece las curvas de aprendizaje de los empleados. Otra posibilidad es la de evaluar el incremento de la planta base de personal fijo, previa evaluación de las perspectivas de la demanda de los productos en el mercado y las proyecciones de crecimiento de la empresa, de tal manera que se garantice su estabilidad económica.

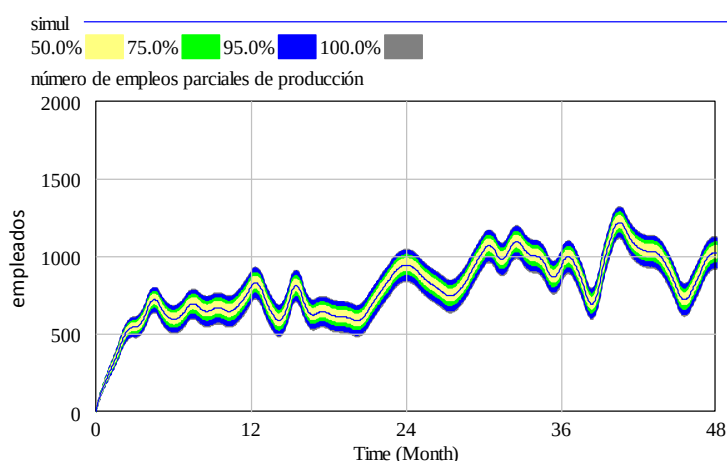


Fig. 12: Evaluación de la sensibilidad número de empleos parciales de producción

En cuanto a la productividad del personal (Figura 13) se observa un incremento al inicio de la simulación, pero, luego continúa con una variación estable alrededor del 15%.

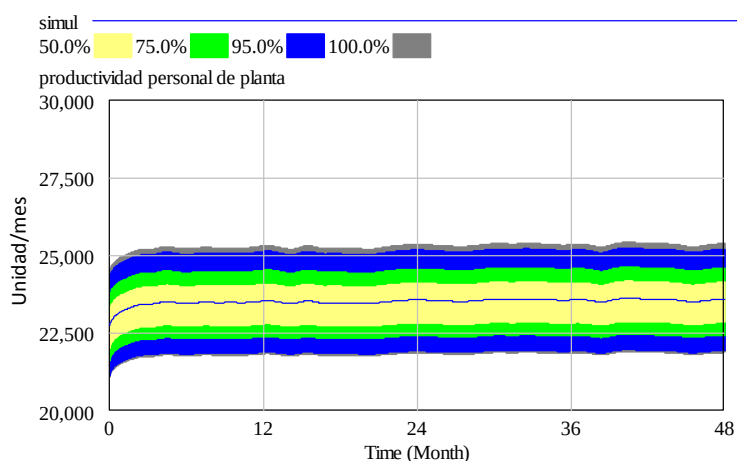


Fig. 13: Evaluación de la sensibilidad de la productividad de personal

Análisis del modelo desde el punto de vista de los sistemas dinámicos. El análisis que se realiza del sistema dinámico es de carácter cualitativo. En ese sentido, el objetivo de la teoría cualitativa de ecuaciones diferenciales es la descripción, lo más completa posible, del diagrama de fases. Esto se logra mediante: el análisis del comportamiento asintótico o a largo plazo de las trayectorias, la identificación de trayectorias especiales, la presentación de cuencas y atractores. Estos elementos caracterizan el comportamiento del sistema. La caracterización del tipo de estabilidad que presenta un sistema está dada por la naturaleza de los valores propios de dicho sistema.

Construcción del modelo de sistemas dinámicos (modelo de ecuaciones diferenciales). Tomando como base la codificación establecida en las tablas 1, 2, 3 y 4 previamente indicadas en el presente artículo, se parte de la ecuación inicial: $EC = \int CE dt$ que indica que la energía consumida es igual a la acumulación de la energía consumida en el tiempo t , la cual se expresa en forma de ecuación diferencial:

$$\frac{dEC}{dt} = CE \quad (1)$$

Esto quiere decir que la variación de la energía consumida, depende de la variación en el consumo energético en el tiempo. El consumo de energía es una variable de flujo, la cual a su vez se genera a partir del producto del factor de ahorro, el consumo energético por unidad y la producción (preparación, ensamble y empaque). Si se aumenta el factor de ahorro, el consumo de energía disminuye. La ecuación resultante se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{dEC}{dt} = (1 - FA) * CEU * PPE \quad (2)$$

El factor de ahorro de energía depende del factor de aporte de la capacitación en el ahorro, la capacitación y la tecnología para la reducción del consumo. La producción (preparación, ensamble y empaque) es una variable de flujo que se construye a partir de la orden de producción comparada con respecto a un valor límite de producción óptima, factor de pérdidas de producción y un factor de aumento por sobrepasar el límite de producción óptima. El consumo energético por unidad se define como un valor constante. La ecuación se muestra a continuación:

$$\frac{dEC}{dt} = (1 - (FAC * C + TRC)) * CEU * \begin{cases} (1 - FPP) * OP(t), & \text{si } OP(t) \leq VLP \\ \left(1 - \frac{FPP}{FAL}\right) * OP(t), & \text{si } OP(t) > VLP \end{cases} \quad (3)$$

La variable capacitación resulta de la motivación para invertir en capacitación, la tecnología para la reducción del consumo depende de factor de ahorro energético de la tecnología y el factor de pérdidas de producción corresponde a las pérdidas implícitas del proceso y pérdidas implícitas de mano de obra. De esta forma, la ecuación sigue en construcción con las siguientes equivalencias:

$$\frac{dEC}{dt} = \left(1 - \left(FAC * \begin{cases} 0, & \text{si } MC=0 \\ FCP * MC, & \text{si } MC > 0 \end{cases} + FAT * \begin{cases} 0, & \text{si } EC \leq MCE \\ 1, & \text{si } EC > MCE \end{cases}\right) * CEU * \begin{cases} (1 - (PIP + PIM)) * OP(t), & \text{si } OP(t) \leq VLP \\ \left(1 - \frac{PIP + PIM}{FAL}\right) * OP(t), & \text{si } OP(t) > VLP \end{cases} \quad (4)$$

Finalmente, la variable motivación para la capacitación está dada por la relación entre el número empleados parciales de producción y el número de empleos fijos de producción. Al incorporar esta variable la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\frac{dEC}{dt} = \left(1 - \left(FAC * \begin{cases} 0, & \text{si } MC=0 \\ FCP * \frac{NEP}{NEF + NEP}, & \text{si } MC > 0 \end{cases} + FAT * \begin{cases} 0, & \text{si } EC \leq MCE \\ 1, & \text{si } EC > MCE \end{cases}\right) * CEU * \begin{cases} (1 - (PIP + PIM)) * OP(t), & \text{si } OP(t) \leq VLP \\ \left(1 - \frac{PIP + PIM}{FAL}\right) * OP(t), & \text{si } OP(t) > VLP \end{cases} \quad (5)$$

Las demás ecuaciones se construyen siguiendo el mismo procedimiento. Las ecuaciones completas del modelo al realizar todo el proceso de construcción y al incorporar las variables y las relaciones definidas, se presentan en la Tabla 5. En la primera columna se identifica el nombre de la variable de estado y, en la segunda columna, la ecuación matemática.

Tabla 5: Ecuaciones del modelo que definen las relaciones entre las diferentes variables

Nombre variable	Ecuación
energía consumida (EC)	$\frac{dEC}{dt} = \left(1 - \left(FAC * \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ si } MC=0 \\ FCP * \frac{NEP}{NEF+NEP}, \text{ si } MC>0 \end{array} \right\} + FAT * \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ si } EC \leq MCE \\ 1, \text{ si } EC > MCE \end{array} \right\} \right) \right) * CEU * \left\{ \begin{array}{l} (1-(PIP+PIM)) * OP(t), \text{ si } OP(t) \leq VLP \\ ((1-(PIP+PIM)/FAL) * OP(t), \text{ si } OP(t) > VLP) \end{array} \right\}$
residuos sólidos (RS)	$\frac{dRS}{dt} = FGR * \left\{ \begin{array}{l} (1-(PIP+PIM)) * OP(t), \text{ si } OP(t) \leq VLP \\ \left(\left(1 - \frac{PIP+PIM}{FAL} \right) * OP(t), \text{ si } OP(t) > VLP \end{array} \right\} * KRP-RS * TA$
número de empleos parciales de producción (NEP)	$\frac{dNEP}{dt} = \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ si } OP(t) \leq PPP \\ \left(\frac{ \left(OP(t) - NUP * \left(1 + \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ si } MC=0 \\ FCP * \frac{NEP}{NEF+NEP}, \text{ si } MC>0 \end{array} \right\} * NEF \right) * TCP \right) }{NUC} \right), \text{ si } OP(t) > PPP \end{array} \right\} - \frac{RPT}{TC}$
inventario de productos terminados (IPT)	$\frac{dIPT}{dt} = \left\{ \begin{array}{l} (1-(PIP+PIM)) * OP(t), \text{ si } OP(t) \leq VLP \\ \left(\left(1 - \frac{PIP+PIM}{FAL} \right) * OP(t), \text{ si } OP(t) > VLP \end{array} \right\} - \frac{IPT}{TPI}$

Con base en las ecuaciones definidas se realiza la recodificación de las variables de estado: energía consumida, residuos sólidos, número de empleos parciales de producción e inventario de productos terminados (Tabla 6) para facilitar la identificación de las variables en el sistema de ecuaciones del modelo.

Tabla 6: Recodificación de variables de estado

Variable	Recodificación
energía consumida	$\dot{x} = dEC/dt$, donde $x = EC$
residuos sólidos	$\dot{y} = dRS/dt$, donde $y = RS$
número de empleos parciales de producción	$\dot{z} = dNEP/dt$, donde $z = NEP$
inventario de productos terminados	$\dot{w} = dIPT/dt$, donde $w = IPT$

De igual forma se estandarizan algunos aspectos que permiten hacer un análisis práctico desde el punto de los sistemas dinámicos. Se asume la orden de producción como un valor constante que corresponde a la media de las órdenes de producción de los dos últimos años (48 periodos mensuales), con un valor de 39000 unidades mes. En este caso la orden de producción está por encima de la Productividad del Personal de Planta (PPP), por lo tanto, se descarta la opción de $OP \leq PPP$. En la empresa, según las necesidades, se tiene un valor mínimo de 5 trabajadores parciales de producción, es así, que $z = z_{min}$ o $z > z_{min}$. A continuación, se hace el reemplazo numérico de los parámetros (constantes) en los sistemas de ecuaciones de cada uno de las topologías planteadas. Los valores numéricos de estos parámetros fueron obtenidos y ajustados a partir de la información suministrada por la empresa y el análisis realizado para las condiciones propias del modelo. Por último, mediante operaciones algebraicas llega al sistema de ecuaciones que se presenta en la Tabla 7.

Simulación del modelo dinámico. El método numérico de solución empleado en la simulación fue el Runge Kutta 4 (RK4) para un periodo de tiempo de 48 meses, igual al que se utilizó en el análisis con dinámica de sistemas, con el fin de establecer posibles comparaciones. En cuanto a los parámetros, en la Tabla 8 se encuentran el código, la descripción, el valor de referencia y el rango para cada uno de ellos. Las variables de estado fueron recodificadas para facilitar el proceso de construcción del algoritmo y su posterior simulación, tal como aparecen en la Tabla 9. Una vez realizada esta nueva codificación, los valores iniciales de las variables de estado fueron los siguientes: $x_1=0$, $x_2=0$, $x_3=5$ y $x_4=90000$. La simulación del modelo se realizó con las variables de estado recodificadas y se analizaron los resultados, relacionados con su comportamiento en función del tiempo, los diagramas de fases y los diagramas de bifurcaciones más significativos. El comportamiento de las variables de estado, en función del tiempo, muestra la evolución de estas en el horizonte de tiempo simulado. Los resultados obtenidos son coherentes con los presentados mediante la dinámica de sistemas, por ejemplo, en el caso de la energía mientras no haya cambios en la tasa de ahorro de la tecnología el comportamiento será creciente.

Tabla 7: Topologías establecidas para el sistema en estudio

Topología	Sistema de ecuaciones
Topología 1	$z=z_{\min}$ y $x \leq \text{MEC}$ $\dot{x}=733200$ $\dot{y}=7332-0.7y$ $\dot{z}=970/3$ $\dot{w}=36660-w/3$
Topología 2	$z=z_{\min}$ y $x > \text{MEC}$ $\dot{x}=725868$ $\dot{y}=7332-0.7y$ $\dot{z}=970/3$ $\dot{w}=36660-w/3$
Topología 3	$z > z_{\min}$ y $x \leq \text{MEC}$ $\dot{x}=733200*(1-0.005*z/(350+z))$ $\dot{y}=7332-0.7y$ $\dot{z}=325-22.75*(z/(350+z))-z/3$ $\dot{w}=36660-w/3$
Topología 4	$z > z_{\min}$ y $x > \text{MEC}$ $\dot{x}=733200*(0.99-0.005*z/(350+z))$ $\dot{y}=7332-0.7y$ $\dot{z}=325-22.75*(z/(350+z))-z/3$ $\dot{w}=36660-w/3$

Tabla 8: Parámetros con valores y rangos de referencia

Código	Valor de referencia	Rango
CEU	20 (kwh/unidad)	18 y 22
PIP	0.02	0.01 y 0.03
PIM	0.01	0.005 y 0.02
FAL	0.5	Es un valor de referencia único
OP	39000 unidades	Valor constante
FGR	0.02	0.01 y 0.03
KRP	10 Kg	0 y 20
TA	0.7	0.1 y 0.8
NUP	65 unidades	60 y 70
NUC	50 unidades	40 y 60
NEF	350 empleados	Es constante
TCP	1	Permanece constante
TC	3 mes	1 y 6 meses
TPI	3 mes	1 y 6
FAT	0.5	0 y 1.
FAC	0.1	0 y 0.12
FCP	0.05	0.01 y 0.06

Tabla 9: Recodificación de variables estado

Nombre variable	Identificación anterior	Identificación actual
energía consumida	x	X ₁
residuos sólidos	y	X ₂
número de empleos parciales de producción	z	X ₃
inventario de productos terminados	w	X ₄

Diagramas de fases. Los diagramas de fases relacionan variables de estado entre sí, por ejemplo, la energía consumida y los residuos sólidos (Figura 14) se observa que a medida que se incrementa la energía, los residuos también lo hacen. Sin embargo, los residuos se estabilizan en un valor estimado de 10400 kg cuando el consumo de energía alcanza un valor de 6.000.000 Kwh. La estabilidad de los residuos se debe a los niveles de producción límites y a la tasa de aprovechamiento, a diferencia de la energía consumida, cuyos registros se presenta en forma acumulada a través del tiempo.

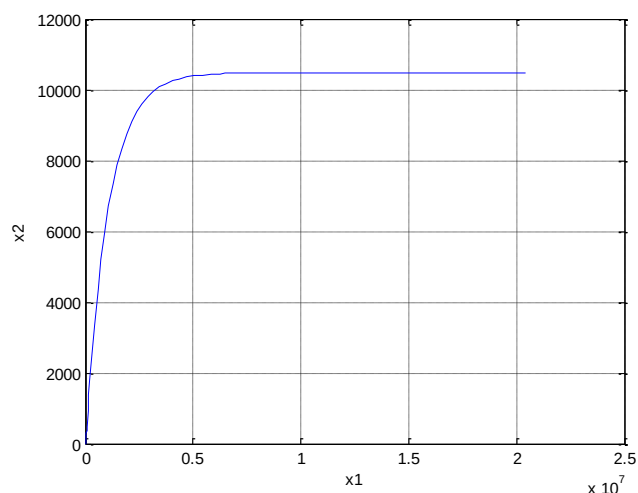


Fig. 14: Diagrama de fases entre energía consumida (x_1) y residuos sólidos (x_2)

En el diagrama de fases de las variables de estado energía consumida, residuos sólidos y número de empleos parciales (Figura 15) se visualiza que los residuos se estabilizan en un valor estimado de 10200 Kg, el número de empleos parciales llega a un valor aproximado de 925 empleados y la energía se acumula mientras haya producción. Lo anterior como consecuencia de los límites dados por la capacidad de producción.

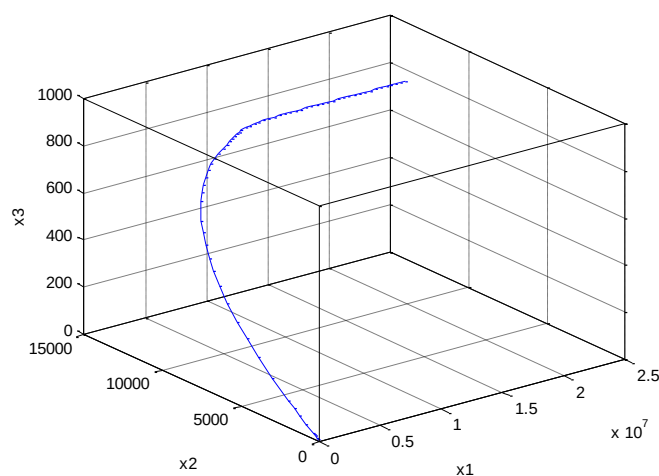
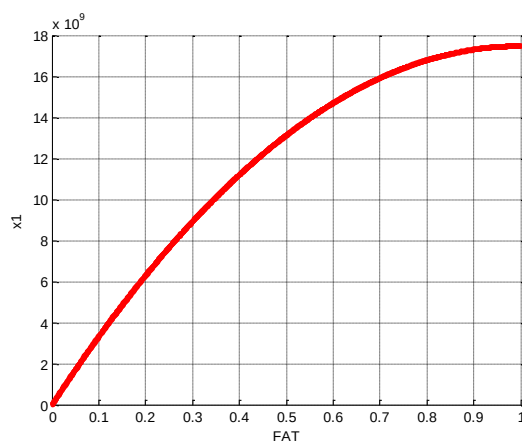


Fig. 15: Diagrama de fases entre energía consumida (x_1), residuos sólidos (x_2) y número de empleos parciales (x_3)

Diagramas de bifurcaciones. Un diagrama de bifurcaciones relaciona una variable de estado con un parámetro de interés, dentro de un rango de valores que puede tomar este último. La bifurcación es un cambio cualitativo en las órbitas de un sistema dinámico debido a cambios en los valores del parámetro (Kuznetsov, 2004). Por lo tanto, el diagrama de bifurcaciones permite visualizar los cambios cualitativos que se dan en la variable de estado con respecto a las variaciones del parámetro utilizado. En el análisis realizado no se encontraron bifurcaciones, solamente se graficó el estado límite, al variar los parámetros. Eso se conoce como “diagramas de continuación de equilibrios”. A manera de ejemplo, se presenta la evaluación mediante el diagrama de bifurcación entre el factor de ahorro energético de la tecnología y la variable consumo de energía (Figura 16) se aprecia que la energía consumida va aumentando a medida que se incrementa el factor de ahorro energético de la tecnología, pero dicho crecimiento se desacelera con tendencia a estabilizarse, esto debido al ahorro que genera en la utilización de energías alternativas.

Fig. 16: Factor de ahorro energético de la tecnología y energía consumida (x_1)

Análisis de retratos de fases y puntos de equilibrio. En este espacio se analizan las topologías establecidas para el sistema en estudio que fueron presentadas en la Tabla 7 del presente artículo. Este análisis se hace con el fin de identificar posibles cuencas atrayentes y puntos de equilibrio mediante la construcción de gráficos bivariados de los retratos de fases entre las diferentes variables de estado de las cuatro topologías. En la Tabla 10 se indican la información básica de referencia para la construcción de las gráficas donde se incluye la identificación de la variable, el valor inicial y el rango para cada una de ellas. Con esta información se realiza el análisis para cada una de las topologías y del sistema de ecuaciones de manera global.

Tabla 10: Valor inicial y rango de las variables para la construcción de los diagramas retratos de fase

Nombre variable	Identificación	Valor inicial	Rango
energía consumida	x	0	0-10000000
residuos sólidos	y	0	0-15000
número de empleos parciales de producción	z	5	0-2000
inventario de productos terminados	w	90000	0-180000

En el análisis de la topología 1 se encontró un único punto de equilibrio, el cual es estable, dado en (10474, 109980). Este punto de equilibrio es coherente con las condiciones reales de la empresa ya que la capacidad de almacenamiento de residuos sólidos es limitada. Cuando se llega a un nivel aproximado de 10474 kg estos deben ser evacuados de la empresa para poder disponer de los demás que se van generando en el proceso de producción. Por otro lado, la capacidad de almacenamiento de productos terminados también está restringida a la capacidad de espacio disponible y a las operaciones de funcionamiento de la empresa. a pesar de este punto de equilibrio encontrado, se concluye que para la topología 1 no se tienen cuencas atrayentes ni puntos de equilibrio para cuatro variables. Una situación similar se presentó para la topología 2.

En las topologías 3 y 4 se encontraron tres puntos de equilibrio bivariados (Figura 17) entre las variables: residuos sólidos y número de empleos parciales de producción (Figura 17b), residuos sólidos e inventario de productos terminados (Figura 17b) y número de empleos parciales de producción e inventario de productos terminados (Figura 17c). Sin embargo, tampoco convergen las cuatro variables tal como se observa en la figura 17^a donde no se encontró punto de equilibrio.

Acciones de sostenibilidad. Una empresa sostenible lo es tanto a su interior como hacia su exterior; por ende, debe proyectar esa condición hacia sus clientes, su entorno y su comunidad. Esto requiere definir políticas que encaminen la empresa hacia la sostenibilidad empresarial y de acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, dichas acciones deben estar encaminadas hacia la mejor utilización de los residuos como uno de los indicadores que caracteriza una empresa sostenible, la disminución de las pérdidas de producción relacionadas con la mano de obra, el material y el proceso mismo de fabricación, el mejoramiento de los niveles de productividad, evaluación de la política de contratación de personal temporal y mecanismos de ahorro energético.

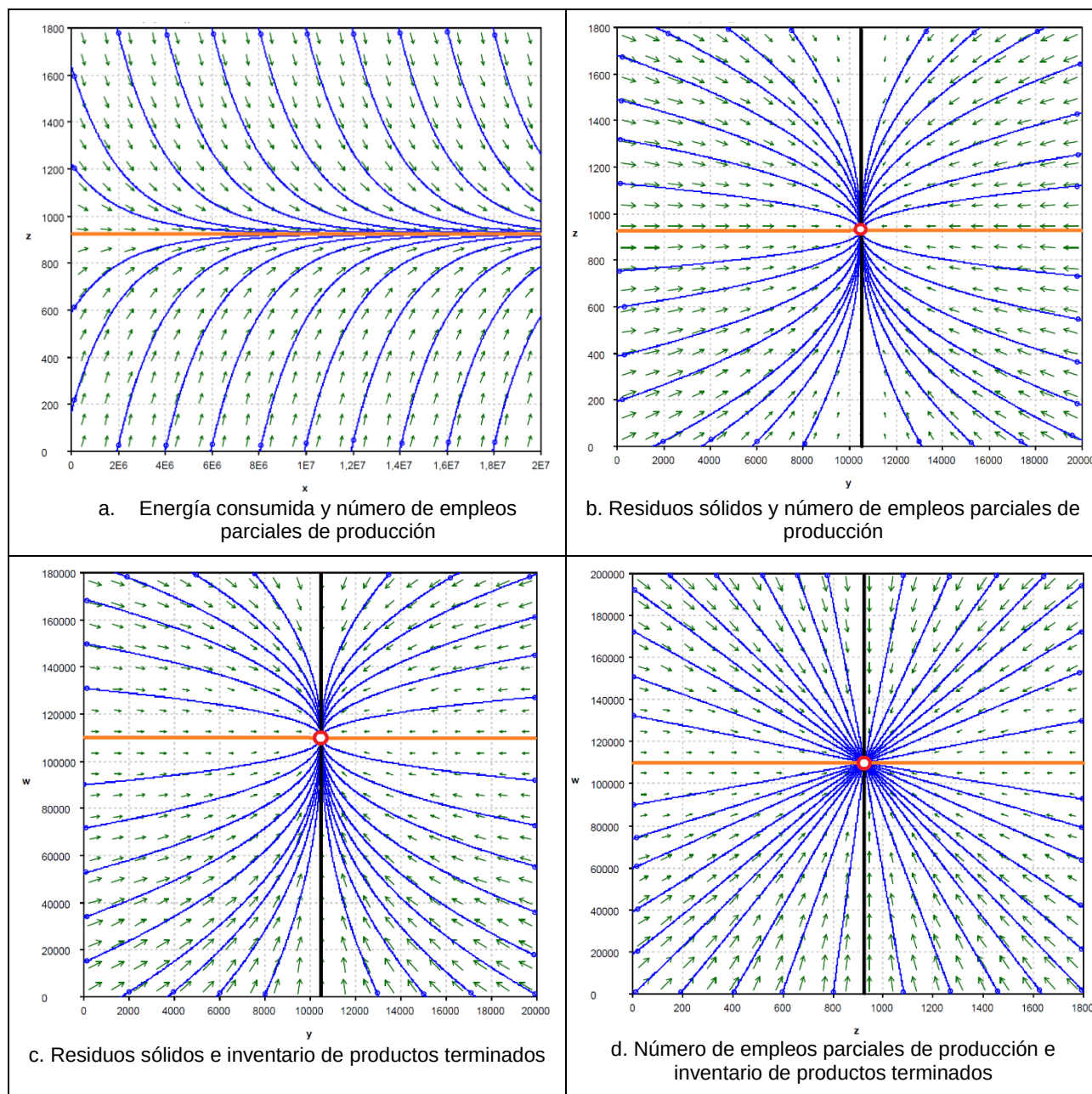


Fig. 17: Retratos de fases y puntos de equilibrio bivariados para la topología 4

CONCLUSIONES

1.- La metodología propuesta es una herramienta que apoya la planificación de escenarios incorporando algunos aspectos claves de la sostenibilidad empresarial, entre ellos, el consumo de energía, la generación de residuos sólidos y la gestión del talento humano. A partir de los escenarios planteados, las directivas de la empresa podrán definir las acciones de sostenibilidad que mejor se ajustan a su entorno y le permitan aumentar sus posibilidades de permanencia en el largo plazo.

2.- La vinculación de la dinámica de sistemas, el análisis de sistemas dinámicos, la estadística y aspectos del desarrollo sostenible en la metodología propuesta, permitió hacer un análisis más integral del modelamiento de la sostenibilidad empresarial, ya que actualmente se centra en la responsabilidad social y la gestión ambiental. La simulación del modelo construido y sus resultados permitieron extraer conclusiones específicas de la empresa objeto de análisis relacionadas con el comportamiento de las órdenes de producción, los niveles reales de producción, las pérdidas que se presentan en la fabricación, los inventarios de productos terminados, los residuos generados en el proceso de manufactura y la productividad. La metodología puede ser replicada y extendida a otras empresas teniendo en cuenta sus características particulares y con énfasis en las áreas críticas detectadas en cada una de las organizaciones.

3.- Los indicadores para la sostenibilidad empresarial que se deben incorporar en el proceso de modelamiento, dependen de la perspectiva con qué se aborde, ya que hoy en día todavía se constituyen en un tema que está en un proceso de desarrollo y discusión. De igual manera, también están relacionados directamente con la actividad económica que tenga la empresa que se va a modelar. Sin embargo, se concluye que dichos indicadores se definen con base en los componentes de las tres dimensiones de la sostenibilidad: económica, ambiental y social.

AGRADECIMIENTOS

A la U. Nacional de Colombia (Sede Manizales) y a la U. Autónoma de Manizales por su apoyo en la realización del proyecto de investigación en el Doctorado de Ingeniería de cuyos resultados se deriva el presente artículo.

REFERENCIAS

- Abdelkafi, N. y K. Täuscher, Business models for sustainability from a system dynamics perspective, doi.org/10.1177/1086026615592930, Organization y Environment, 29 (1), 74 – 96 (2016)
- Ackermann, F. y C. Eden, Strategic management of stakeholders: theory and practice. doi.org/10.1016/j.lrp.2010.08.001, Long Range Planning, 44 (3), 179 – 196 (2011)
- Antequera, J., Propuesta metodológica para el análisis de la sostenibilidad regional, Tesis Doctoral, programa de doctorado en sostenibilidad, tecnología y humanismo, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España (2012)
- Barcellos de Paula, L., Modelos de gestión aplicados a la sostenibilidad empresarial, Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, Barcelona, España (2010)
- Ceballos, Y. F., M. Uribe y G. Sánchez, Modelo de Dinámica de Sistemas para la Predicción del Comportamiento del Mercado Porcícola, doi.org/10.4067/S0718-07642013000400013, Información Tecnológica, 24 (4), 117-124 (2013)
- Dyllick, T. y K. Muff, Clarifying the meaning of sustainable business: introducing a typology from business-as-usual to true business sustainability, doi.org/10.1177/1086026615575176, Organization and Environment, 29 (2), 156 – 174 (2016)
- Elsawah, S., S. A. Pierce y otros cinco autores, An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies, doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.001, Environmental Modelling and Software, 127 – 145 (2017)
- Espinoza, A., S. Bautista y otros tres autores, Sustainability assessment to support governmental biodiesel policy in Colombia: A system dynamics model, doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.168, Journal of Cleaner Production, 141, 1145 – 1163 (2017)
- Fernández, L. y M. Gutiérrez, Bienestar Social, Económico y Ambiental para las Presentes y Futuras Generaciones, doi.org/10.4067/S0718-07642013000200013, Información Tecnológica, 24 (2), 121-130 (2013)
- Forrester, J. W., Industrial Dynamics, 1ª Ed., 49-308, Pegasus Communications, Inc. Waltham, Massachusetts, USA (1999)
- García, J. M., Theory and Practical Exercises of System Dynamics, 4ª Ed., 10-300, Barcelona, España (2017)
- Geissdoerfer, M., S.N. Morioka y otros dos autores, Business models and supply chains for the circular economy, doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.159 (2018), Journal of Cleaner Production, 190, 712-721 (2018)
- Gómez, U. y O. Gómez, Modelo de simulación para el proceso de producción en empresas de confección textil, Revista Sistemas & Telemática, 11(24), 73-89 (2013)
- Holden, E., K. Linnerud y D. Banister, The imperatives of sustainable development, doi.org/10.1002/sd.1647, Sustainable Development, 25(3), 213 – 226 (2016)
- Ibarra, A. M., Principios de la responsabilidad social empresarial en el ordenamiento jurídico colombiano, Revista de Derecho, 41, 51 – 82 (2014)
- Ibarra, D., Modelado para la evaluación de sostenibilidad en la cadena de suministro de bioetanol, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia (2018)
- ICONTEC, Norma Técnica NTC - ISO Colombiana 14031. Gestión ambiental. Evaluación del desempeño ambiental. Directrices, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Bogotá, Colombia (2016)
- Jaghbeer, Y., S. I. Hallstedt y otros dos autores, Exploration of simulation-driven support tools for sustainable product development, doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.069, Procedia CIRP, 64, 271 – 276 (2017)
- Kuznetsov, Y. A., Elements of applied bifurcation theory, 3ª Ed., 7-31, Inc. Springer, New York, USA (2004)
- Maffini, C., J. Marques y otros tres autores, Management for sustainability in companies of the mining sector: an analysis of the main factors related with the business performance, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.030, Journal of Cleaner Production, 84, 84-93, (2014)
- Martens, M. y M. Carvalho, Key factors of sustainability in project management context: A survey exploring the project managers' perspective, https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.04.004, International Journal of Project Management, 35 (6), 1084-1102 (2017)

MATLAB Release 2017a, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States (2017)

Morgan, J.S., S. Howick y V. Belton, A toolkit of designs for mixing discrete event simulation and system dynamics, doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.016, European Journal of Operational Research, 257(3), 907-918 (2017)

Nabavi, E., K.A. Daniell y H. Najafi, Boundary matters: the potential of system dynamics to support, doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.032, Journal of Cleaner Production, 140, 312 – 323 (2017)

Panagiotakopoulos, P.D., A. Espinosa y J. Walker, Sustainability management: insights from the viable system model, doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.035, Journal of Cleaner Production, (113), 792 – 806 (2016)

Panarotto, M., J. Walla y T. Larsson, Simulation-driven design for assessing strategic decisions in the conceptual design of circular PSS business models, doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.026, The 9th CIRP IPSS Conference: Circular Perspectives on Product/Service-Systems, 64, 25-30 (2017)

Plasencia, J.A., D.F. Marrero y otros dos autores, Modelos para evaluar la sostenibilidad de las organizaciones, doi.org/10.18046/j.estger.2018.146.2662, Estudios Gerenciales, Journal Management and Economics for Iberoamérica, 34(146), 63-73 (2018)

Poor L., R. R. y M. Amiri, A system dynamics modeling approach for a multi-level, multi-product, multi-region supply chain under demand uncertainty, doi.org/10.1016/j.eswa.2015.12.043, Expert Systems with Applications, 51, 231 – 24 (2016)

Rajala, R., M. Westerlund y T. Lampikoski, Environmental sustainability in industrial manufacturing: reexamining the greening of interface's business model, doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.057, J. of Cleaner Production, 115, 52-61 (2016)

Rodrigues, V. P., D. C. Pigosso y T. C. McAlloone, Simulation-based business case for PSS: a system dynamics framework, doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.014, Procedia CIRP. The 9th CIRP IPSS Conference: Circular Perspectives on Product/Service-Systems, 64, 283 – 288 (2017)

Rumeser, D. y M. Emsley, Key challenges of system dynamics implementation in project management, doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.09.004, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 230, 22 – 30 (2016)

Sauvé, S., S. Bernard y P. Sloan, Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research, doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002, Environmental Development, 17, 48-56 (2016)

Schaffernicht, M., Indagación de situaciones dinámicas mediante la dinámica de sistemas, 1ª Ed., 33-43, 143-242, Editorial Universidad de Talca, Talca, Chile (2009)

Stefan, S., E. G. Hansen y F. Lüdeke-Freund, Business models for sustainability: origins, present research, and future avenues, doi.org/10.1177/1086026615599806, Organization y Environment, 29 (1), 3 – 10 (2016)

Sterman, J.D., Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world, 1ª Ed., 83-106, 522-550, Massachusetts Institute of Technology Sloan School of Management, McGraw – Hill, Massachusetts, USA (2000)

Suck, H.B. y S. K. Behera, Methodological aspects of applying eco-efficiency indicators to industrial symbiosis networks, doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.032, Journal of Cleaner Production, 64, 478-485 (2014)

Thompson, J.P., S. Howick y V. Belton, Critical learning incidents in system dynamics modelling engagements, doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.048, European Journal of Operational Research, 249, 945 – 958 (2016)

Torres, J. P., M. Kunc y F. O'Brien, Supporting strategy using system dynamics, https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.018, European Journal of Operational Research, 260, 1081–1094 (2017)

Walrave, B. y R. Raven, Modelling the dynamics of technological innovation systems, doi.org/10.1016/j.respol.2016.05.011, Research Policy, 45 (9), 1833–1844 (2016)

Williams, A., S. Kennedy y otros dos autores, Systems thinking: A review of sustainability management research, doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.002, Journal of Cleaner Production, 148, 866 – 881 (2017)

Zhang, Y., T. Zhao y otros cuatro autores, Modeling and dynamic assessment on sustainable development of drainage enterprise: Application of a coupled system dynamics comprehensive assessment model, doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.055, Journal of Cleaner Production, 141, 157 – 167 (2017)

Zhao, B., T. Tang y B. Ning, System dynamics approach for modelling the variation of organizational factors for risk control in automatic metro, doi.org/10.1016/j.ssci.2017.01.002, Safety Science, 94, 128–142 (2017)

