

“Integración de la Dinámica de sistemas y la teoría TRIZ en el diseño conceptual de nuevos procesos para tratar un residuo orgánico que afecta a la población: las heces caninas”

MIA. Estefanía del Carmen Landa Salinas, Dr. Guillermo Cortés Robles, Dr. Jesús Delgado Maciel

fanilanda12@gmail.com, gcortesr@orizaba.tecnm.mx, Jesus.delgado@anahuac.mx

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba

Av. Oriente 9 No. 852, Col. E. Zapata, CP 94320, Orizaba, Veracruz

Universidad Anáhuac Veracruz, Campus Córdoba-Orizaba

Calle Universidad 100, Col. Rancho San Emigdio, C.P. 94500, Córdoba, Ver.

Resumen

El proceso de diseño conceptual de nuevos productos o procesos está sujeto a múltiples restricciones (costo, tiempo, originalidad, entre otros). En consecuencia, el diseño conceptual es un proceso crucial, ya que determina el éxito de las etapas siguientes en el desarrollo de un producto o proceso. Los enfoques tradicionales para enfrentar dichos retos como la lluvia de ideas, el método de prueba o error, entre otros, han demostrado sus limitaciones en el contexto actual y los sistemas socio-ecológicos y las ciudades sustentables no escapan a esta situación. En consecuencia, es necesario proponer nuevos enfoques que permitan resolver problemas de forma sistemática y capaces de proponer soluciones inventivas. La integración de la Teoría de Resolución de Problemas Inventivos o TRIZ y el enfoque de la Dinámica de Sistemas (SD) poseen las competencias necesarias para investigar y tratar de resolver los problemas asociados a la transformación de los sistemas socio-ecológicos y las ciudades sustentables. Este artículo describe la integración entre TRIZ y SD bajo la forma de una metodología para realizar el análisis y propuesta de solución de un problema que afecta a la salud pública: el tratamiento de las heces caninas que se recolectan en una población.

Palabras clave: TRIZ, Dinámica de Sistemas, Diseño conceptual, Biodigestor anaerobio.

Abstract

The conceptual design stage of products or processes evolves under several restrictions (cost, time, novelty, among other). Hence, conceptual design is a crucial process, which strongly affects success in the remaining design stages of new products or processes. The traditional approaches to face this initial design stage (i.e. brainstorming, trial and error method) have several limitations and the context of socio-environment systems and sustainable cities do not escape from this situation. Consequently, it is necessary to propose new methods and tools for systematically solve complex problems without neglecting the originality and relevance of inventive solutions. This article faces this challenge by proposing the integration of the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) and the System Dynamics (SD) approach. This integration has the abilities to model and search for new solutions in the context of socio-environment systems and sustainable cities. Thus, this article describes the integration of TRIZ and SD to configure a methodological framework to analyze and generate potential solutions to solve a social problem that affects the community: to treat the canine feces collected in a small city.

Keywords: TRIZ, System Dynamics, Conceptual Design, Anaerobic Digestions.

El diseño conceptual es una etapa crítica en el proceso de desarrollo de nuevos productos y procesos. Es en esta etapa que se modelan las principales estrategias de solución para un problema. En consecuencia, es una etapa crucial, ya que determina la efectividad de un proceso o la originalidad de un producto [1]. Uno de los principales objetivos del diseño conceptual es la creación de soluciones que puedan responder a los requerimientos planteados durante el desarrollo de nuevos productos o procesos que son cada vez más complejos. Este proceso presenta muchos desafíos los cuales demandan de nuevos enfoques, ya que los métodos tradicionales de análisis y solución de problemas como la lluvia de ideas, el análisis causa-efecto, entre muchos otros han demostrado sus limitaciones [2], [3]. Adicionalmente, el mercado exige soluciones únicas y originales y la etapa del diseño conceptual representa varios desafíos como: la exploración de nuevos enfoques, la importancia de evaluar con anticipación la solución potencial y la búsqueda de un método que pueda gestionar la información cuando se cuenta con múltiples alternativas de diseño [4].

Paralelamente, al confrontarse a la imperiosa necesidad de crear nuevos productos, procesos o servicios, con mucha frecuencia el ser humano trata de resolver sus problemas haciendo uso de analogías e intenta comparar el conflicto de interés con uno similar que haya resuelto en el pasado. Por tal motivo, la solución dependerá muchas veces de las experiencias de vida o profesionales de un individuo [5]. En consecuencia, es necesario implementar un proceso más eficiente para asistir la etapa de diseño conceptual, lo que se convierte en una estrategia para facilitar la gestión de la innovación. Desde el punto de vista técnico, existe un enfoque basado en la evolución de la tecnología capaz de satisfacer muchos de los requerimientos que impone el proceso de desarrollo de nuevos productos o procesos: La teoría TRIZ. La “Teoría para resolver problemas de inventiva” (TRIZ) es una herramienta capaz de guiar a un individuo en la búsqueda de soluciones inventivas cuando el conflicto se modela como una contradicción física o técnica y situaciones donde es necesario identificar cambios potenciales en un sistema, a través de un análisis de tendencias de evolución [6]. Una contradicción se observa cuando un sistema, un componente o un estado del sistema exige un comportamiento mutuamente excluyente, pero necesario para alcanzar un objetivo [7]. La bibliografía sobre TRIZ identifica dos tipos fundamentales de contradicciones: físicas y técnicas. Una contradicción física se presenta cuando el sistema, un componente o un estado debe

presentar dos estados opuestos para ofrecer una función (ejemplo: para enhebrar una aguja es necesario que el orificio sea grande para poder realizar este proceso sin esfuerzo, pero es necesario que el orificio de la aguja sea pequeño para ofrecer la menor resistencia posible al unir dos materiales). Una contradicción técnica se presenta cuando al intentar modificar o mejorar un parámetro útil en un sistema, otro parámetro también útil lo impide o empeora de manera inadmisiblemente o un efecto nefasto en el sistema se incrementa al intentar realizar una mejora (al incrementar la potencia de un motor, se incrementa su peso, reduciendo su eficiencia o se incrementa el nivel de ruido). TRIZ contiene una caja de herramientas para resolver este tipo de conflictos: los principios de separación para contradicciones físicas y la matriz de contradicciones técnicas para el otro tipo de conflicto descrito en líneas anteriores.

Por otra parte, la dinámica de sistemas (SD) es un enfoque asistido por computadora que permite modelar las funciones entre los componentes de un sistema complejo y permite representar el comportamiento de un sistema en el tiempo en distintos escenarios. Al utilizar ambas metodologías TRIZ Y SD para resolver un problema, se obtiene una herramienta poderosa capaz de dar soluciones a problemas inventivos complejos, permite observar el comportamiento de una alternativa de solución en el tiempo, condición que no puede ser abordada por TRIZ. Simultáneamente, TRIZ le ofrece a la Dinámica de Sistemas un conjunto de herramientas para modelar y resolver problemas inventivos como una estrategia para administrar el desarrollo de un proceso, producto o servicio [8], [9], [10].

Marco teórico

En esta sección se elaboró un conciso análisis con la finalidad de observar la aplicación de TRIZ y SD en el desarrollo de nuevos productos. El análisis inicia con TRIZ, que es una metodología que engloba una serie de herramientas capaces de dar solución a diversos problemas inventivos y posteriormente, la Dinámica de sistemas que es una metodología capaz de modelar sistemas complejos. Los puntos siguientes exponen las diversas áreas de aplicación.

[11] Combinan el uso de la inteligencia colectiva y de la funcionalidad de la web como plataforma para potenciar un entorno creativo a través de la colaboración en donde resaltan que el éxito del desarrollo conceptual depende de la participación de los colaboradores y de la validación a través de internet. Por su parte, [12] realizan una

combinación de TRIZ con el Enfoque de diseño sistemático (SDA) para la resolución de problemas críticos en el diseño conceptual de piezas de aviones. La metodología propuesta aumenta la eficiencia en seguridad y creatividad en el proceso de diseño conceptual. El modelo conduce a la capacidad de identificar varios niveles de funciones de los componentes. Posteriormente, [13] presenta un modelo híbrido entre AD (Diseño axiomático) y TRIZ para el enfoque de análisis de problemas y generación de ideas en la etapa de diseño conceptual durante la creación de nuevos productos. El enfoque se aplica a un equipo de rehabilitación con muy buenos resultados. En el estudio de [14] propone una metodología de diseño basadas en las herramientas de TRIZ que apoya la fase de diseño preliminar, con el objetivo de incrementar las ideas en la actividad de investigación de conceptos. Los autores [15] combinan los esquemas de modelos de negocios convencionales con la dinámica de sistemas para dar como resultado una herramienta de estrategia de diseño que pueda superar las limitaciones relacionadas con la estática en la representación del modelo de negocio. El modelo

propuesto trata de superar las carencias de esquemas de representación de Business model (BM) convencionales y adopta una perspectiva que permite identificar las

principales relaciones causa-efecto. Por su parte el autor [16], proporciona información sobre la relación entre las consideraciones de diseño al comienzo de la vida de un producto y sus implicaciones para la etapa de evolución cuando comienza un nuevo ciclo de fabricación. Trata de aportar información sobre las consideraciones en los retrasos y el refuerzo en los circuitos de retroalimentación aplicando la SD en el diseño de una eficaz cadena de suministro de circuito cerrado. Desde otra perspectiva, [17] utilizan la teoría basada en recursos para construir modelos de dinámica de sistemas para las PYMES antes y después de la innovación en el servicio, con el fin de desarrollar un conjunto de mecanismos de evaluación. Los resultados de la simulación mostraron que las PYMES enfrentan dificultades operativas debido a la globalización, por lo tanto, deben de invertir recursos en desarrollar adaptabilidad al mercado, capacidad de aplicación del conocimiento, de colaboración y aplicación eficaz de las TIC's para la mejora en la innovación en el servicio.

Con respecto a la integración de TRIZ y SD, [10] propone la combinación de TRIZ con el análisis funcional (FA) y

la Dinámica de sistemas como una metodología que resuelve los inconvenientes presentados en el análisis y la formulación de los problemas inventivos, además de poder modelar las relaciones causales entre las variables. Mas tarde [4], los autores integran las herramientas de TRIZ Y SD como una nueva metodología capaz de hacer frente a los desafíos del diseño conceptual de nuevos productos, presentando ventajas en la toma de decisiones, en la identificación del conflicto y la simulación de las propuestas de diseño pero la aportación se concentra en el uso del Análisis Campo-Sustancia.

Con respecto a la integración de TRIZ y SD, los trabajos de [8], [10] y [4] son las únicas referencias que proponen una integración entre ambos enfoques, lo que revela la emergencia de un área de investigación relevante y, en consecuencia, una oportunidad para su investigación y desarrollo.

Resultados

En este trabajo se propone una metodología adaptada de los trabajos de [18], [4]. La tabla 1 muestra la metodología propuesta integrando las herramientas de TRIZ Y DS.

Metodología para la conceptualización de nuevos procesos		
Fase 1	Conceptualización	1. Selección del escenario. 2. Definición del propósito del modelo. 3. Identificación de las variables críticas 4. Establecimiento del horizonte de tiempo. 5. Desarrollo del diagrama causal.
Fase 2	TRIZ	1. Planteamiento del problema en términos de TRIZ. 2. Aplicación de la herramienta de contradicciones. 3. Ajuste de los principios inventivos al problema específico
Fase 3	Formulación	1. Elaboración del diagrama de Forrester. 2. Determinación de las ecuaciones matemáticas. 3. Estimación y selección de los parámetros del modelo.
Fase 4	Evaluación	1. Simulación del modelo y evaluación bajo diferentes supuestos.
Fase 5	Implementación	1. Presentación del modelo de manera accesible al usuario.

Tabla 1. Metodología para la conceptualización de nuevos procesos. Fuente: Adaptada de [18], [4].

Esta metodología es usada en un caso de estudio dedicado a la transformación de un residuo muy común en las ciudades y que afecta bastante a la salud pública: las heces caninas. Este caso de estudio es el complemento de un desarrollo que propone la implementación de un contenedor inteligente para heces caninas. Este contenedor, cuya descripción está fuera del alcance de este artículo, ofrece una serie de recompensas que pueden ser físicas o virtuales, a los transeúntes que depositan las heces de sus mascotas. De acuerdo a la información recolectada con las autoridades de la ciudad de Orizaba (zona en la que se desarrolló el proyecto del contenedor), se recolectan anualmente más de 80 toneladas de estos residuos. En consecuencia, es necesario analizar un proceso para tratar de eliminar las heces caninas y reducir su impacto ambiental. Por esta razón, se optó por analizar un proceso de digestión anaerobia con la finalidad de transformar este residuo orgánico en biogás. Las secciones siguientes describen la aplicación de la metodología propuesta en la tabla 1.

Fase 1. Conceptualización

El diagrama causal se analiza con detalle en la etapa siguiente. Es necesario señalar que este tipo de diagramas presentan dos tipos de bucles o circuitos completos y también se encuentra la polaridad de cada arco que une a una variable con otra.

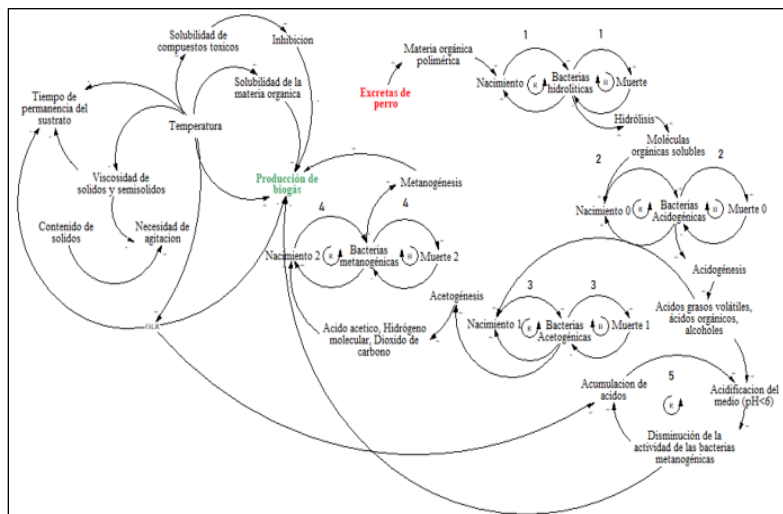


Figura 1. Diagrama causal del proceso de digestión anaerobia.

En la figura 1 se presenta el diagrama causal del sistema, el cual es una representación de su estructura mediante flechas para indicar las relaciones causales entre los

elementos, las cuales están acompañados de un signo positivo o negativo dependiendo si la variable de origen ejerce una acción en el mismo sentido en el elemento destino o un efecto contrario. En este caso el diagrama representa nueve bucles, de los cuales cinco son de retroalimentación positivo (desequilibrio) y cuatro son de retroalimentación negativo (balanceo). Los primeros cuatro bucles hacen referencia a las reacciones llevadas a cabo en el proceso de digestión anaerobia que son la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis, estos diagramas representan la reproducción y muerte bacteriano. El quinto ciclo representa el bucle de retroalimentación positivo que gira en torno al pH, y debido a la introducción de una sustancia acidificante en el medio en la recolección de las heces, el pH comienza a descender y como resultado la producción de gas se detiene, ya que las bacterias productoras de biogás son muy sensibles a los cambios en el pH.

Fase 2. TRIZ

Cada bucle representa un conflicto y cada conflicto se puede formular como una contradicción. En el diagrama generado en la figura 1, se presentan cinco bucles de retroalimentación y cuatro bucles de balanceo que engloban las cuatro reacciones principales de la digestión anaerobia. Se seleccionó el quinto bucle de retroalimentación que representa una caída en el pH del medio el cual puede desembocar en una paralización total del proceso. Se formula el conflicto en términos de TRIZ y se aplican los principios adecuados para su solución: “Se necesita que el material capaz de controlar el pH esté presente, pero al mismo tiempo se requiere su ausencia para obtener una forma de control de pH que no afecte la composición del digerido (volverlo tóxico) y no requiera un control continuo”. Este conflicto se modeló como una contradicción física, de modo que es necesario aplicar un principio de separación. [19] propone cuatro principios de separación: en el tiempo, en el espacio, entre el todo y sus partes y bajo condiciones. La descripción de estos principios puede ser consultada en [7] quien ofrece una serie de lineamientos para seleccionar el principio adecuado para resolver una contradicción física. El principio seleccionado es la separación en el tiempo, ya que se necesita elevar el pH en un determinado momento y cuando éste alcance un pH neutro su acción desaparezca.

Fase 3. Formulación

En esta etapa se elabora el diagrama de Forrester (ver Figura 2), se determinan las ecuaciones matemáticas y los parámetros del modelo. La ecuación 1 representa al modelo.

$$B(t) = B(t_0) + \int_0^t (Ed - F - Pb) dt \quad (1)$$

Donde:

B = Biodigestor

Ed = Entrada de materia

Pb = Producción de biogás

F = Fertilizante

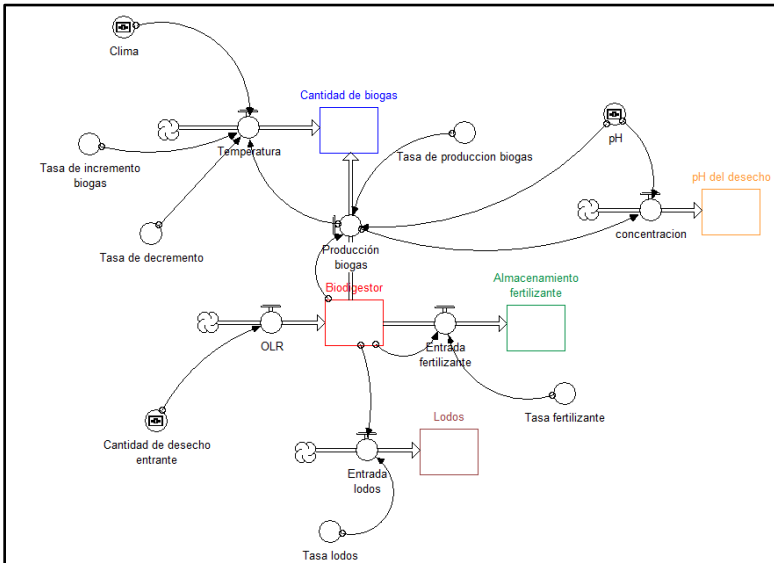


Figura 2. Diagrama de Forrester del digestor anaerobio.

Fase 4. Evaluación

En esta etapa se simula el modelo y se verifica la interacción entre sus variables y posteriormente se expone el modelo a distintas condiciones. Para su evaluación se recurrió a la validación por condiciones extremas, que es la exposición del modelo a escenarios excesivos de operación para observar y analizar si su comportamiento es congruente con la realidad [20].

Fase 5. Implementación

El propósito de esta etapa es presentar el modelo de una forma accesible, para que el usuario pueda hacer uso de esta herramienta (ver Figura 3).

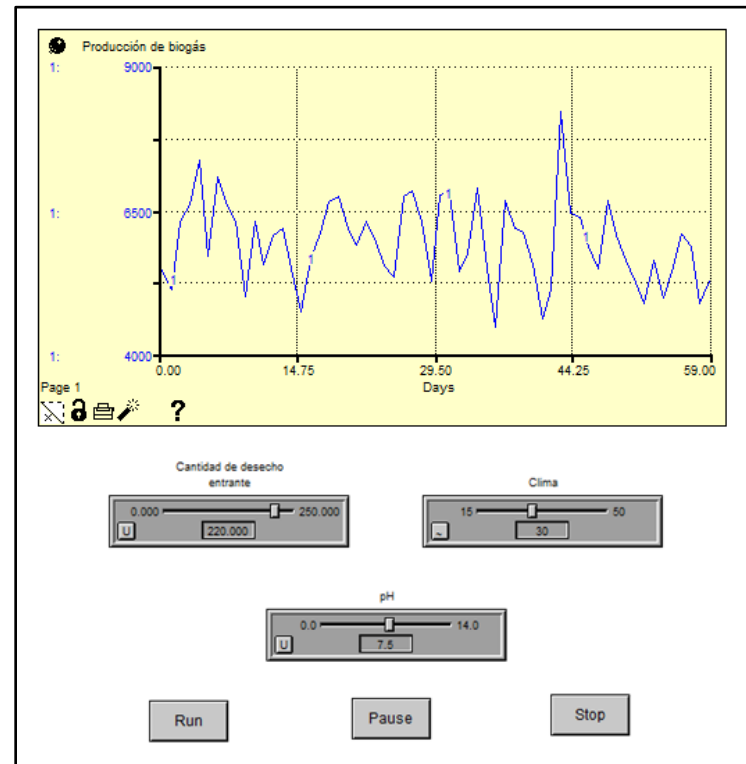


Figura 3. Interfaz de usuario.

El modelo configurado con las ecuaciones pertinentes que se demuestra en la Figura 3, demuestra la producción de biogás (en litros/día) con un tiempo de retención (RTH) de 59 días, con una temperatura de 30°C, además de un rango de operación de pH óptimo, es decir cercano al neutro y con una cantidad de desecho entrante de 220 Kg/día.

Discusión de resultados

Se realizó el análisis de un proceso de biodigestión de un residuo nefasto para cualquier ciudad mediante la integración de dos técnicas: la teoría TRIZ y la Dinámica de sistemas. La metodología aplicada permite modelar los conflictos presentes en el sistema y crear una conexión directa con las herramientas potenciales para resolverlos. La metodología descrita le permite a la teoría TRIZ realizar un modelado más estricto de una situación y observar el impacto de una solución potencial. Al mismo tiempo, le proporciona a la Dinámica de Sistemas la capacidad de resolver los problemas que se generan durante el análisis de un sistema, especialmente aquellos problemas que contienen una contradicción. Desde esa perspectiva, ambos enfoques obtienen beneficios,

condición que no está presente si se considera a TRIZ o a la Dinámica de Sistemas de manera aislada. En el caso de estudio se identificaron las variables que inciden de manera directa en el funcionamiento de un biodigestor anaerobio para posteriormente hacer una discriminación de las variables críticas de control. Con estas variables se desarrolló el diagrama causal para analizar la interacción que existe entre ellas, lo que permitió construir el diagrama de Forrester en el software Stella.

El modelo desarrollado fue expuesto a condiciones extremas, con el principal propósito de analizar su comportamiento, observando como interactúan sus variables. Los resultados obtenidos en el modelo desarrollado coinciden con los datos obtenidos en la literatura, con lo que se comprueba la validez del modelo.

Conclusiones

Se presentó la metodología que fue empleada para el diseño conceptual del sistema, ésta consta de cinco fases las cuales involucran una serie de actividades obtenidas de una síntesis bibliográfica. La Dinámica de sistemas y la metodología TRIZ por separado presentan diversas limitantes a la hora de hacer frente al proceso de diseño, pero al combinarlas, se obtiene una herramienta prometedora y capaz de dar soluciones a los problemas de diseño más complejos.

Es importante señalar que este trabajo es la continuidad de un proyecto titulado “Desarrollo de un contenedor para almacenar desechos orgánicos caninos mediante el diseño inventivo, así como la cartera de servicios de soporte en la región centro de Orizaba” por lo que el principal propósito es la propuesta de tratamiento de esos desechos, ya que por lo regular no existe una gestión adecuada de estos residuos caninos y suelen terminar en los vertederos municipales y por lo tanto no se ha enfocado la atención necesaria a los problemas de salud que estos pueden ocasionar debido a los patógenos que pueden contener los desechos, además de la inminente contaminación del aire, tierra, agua y los problemas en cuanto a la gestión de la limpieza urbana.

Referencias

- [1] W. Liu, Tan R., G. Cao, Z. Zhang, S. Huang, y L. Liu, «A proposed radicality evaluation method for design ideas at conceptual design stage. *Computers & Industrial Engineering*», pp. 132, 141-152., 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.04.027>.
- [2] M. Riesener, E. Rebentisch, C. Doelle, M. Kuhn, y S. Brockmann, *Methodology for the Design of Agile Product Development Networks*. Procedia CIRP, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.172>.
- [3] I. Horváth, *On some crucial issues of computer support of conceptual design.*, Product Engineering. Springer, Dordrecht, pp 123-142, 2005.
- [4] J. Delgado-Maciel, G. Cortés-Robles, C. Sánchez-Ramírez, J. García-Alcaraz, y J. M. Méndez-Contreras, «The evaluation of conceptual design through dynamic simulation: A proposal based on TRIZ and system Dynamics», 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106785>.
- [5] T. Lubart, *The Creative Process: Perspectives from Multiple Domains*, 2018.^a ed. Palgrave MacMillan, 2018.
- [6] G. Altshuller, *Innovation Algorithm TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity*. 1999.
- [7] S. D. Savransky, *Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving.*, Boca Raton, Florida: CRC Press. 2000.
- [8] J. Delgado-Maciel, G. Cortés-Robles, E. Jiménez, C. Sánchez-Ramírez, y J. García-Alcaraz, «Application of the Systems Dynamics Approach to Model Inventive Problems.», 2017.
- [9] F. In Martinez, R. Urraca, H. Quintian, y E. (Eds.) Corchado, *Conference LNCS on Hybrid Artificial Intelligent Systems*. Logroño, Spain: Springer., 2017.
- [10] J. Delgado-Maciel, G. Cortés-Robles, G. Alor-Hernández, G. Alcaráz, y S. Negny, «A comparison between the Functional Analysis and the Causal-Loop Diagram to model inventive problems.», *Procedia CIRP*, pp. 70, 259-264., 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.235>.
- [11] R. López, Negny Stéphane, Pierre Belaud, y Marc Le Lann, «Collective intelligence to solve creative problems in conceptual design phase.», *Procedia Engineering*, vol. 131, pp. 850-860, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.394>.
- [12] K. Manami, K. Ridgway, y M. Roshdi, «Modelling the Conceptual Design Process with Hybridization of TRIZ Methodology and Systematic Design Approach.», *Procedia Engineering*, vol. 131, pp. 1064-1072, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.424>.

- [13] Y. Tsung Ko, «Modeling a hybrid-compact design matrix for new product innovation.», *Computers & Industrial Engineering*, vol. 107 (C), pp. 345-359, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.04.016>.
- [14] K. Hmina, M. Sallaou, A. Arbaoui, y L. Lasri, «A preliminary design innovation aid methodology based on energy analysis and TRIZ tools exploitation.», *International Journal of Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, p. 12(3), 919-928, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s12008-017-0455-3>.
- [15] F. Cosenz y G. Noto, «A dynamic business modelling approach to design and experiment new business venture strategies.», *Long Range Planning*, vol. 51, pp. 127-140, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2017.07.001>.
- [16] M. Franco, «A system dynamics approach to product design and business model strategies for the circular economy.», *Journal of Cleaner Production*, vol. (241) 118327, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118327>.
- [17] Y. Hao Hsieh y H. Y. Chou, «Modeling the impact of service innovation for small and medium enterprises: A system dynamics approach.», *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 82, pp. 84-102, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2017.12.004>.
- [18] J. D. Sterman, *Business Dynamics . System Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill, 2000.
- [19] G. Altshuller, *The Innovation Algorithm: TRIZ, systematic innovation, and Technical Creativity*. 2007.
- [20] R. Ramos-Hernández, «Diseño y evaluación de cadenas de suministro de energía renovable generada con biomasa.», Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Ver. México, 2020.