

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA
DEPARTAMENTO DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**“MODELACIÓN DINÁMICA DE PROBLEMAS INVENTIVOS:
DISEÑO DE ESTRATEGIAS ORIENTADAS A LA RESOLUCIÓN
SIMULTÁNEA DE CONFLICTOS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

M.I.I. Jesús Delgado Maciel

DIRECTOR DE TESIS:

DR. GUILLERMO CORTÉS ROBLES

COMITÉ EVALUADOR:

DR. GINER ALOR HERNÁNDEZ

DR. ALEJANDRO ALVARADO L.

DR. JUAN MANUEL MÉNDEZ C.

DR. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ R.

DR. DIEGO TLAPA MENDOZA

Orizaba, Veracruz, 24 de junio de 2021



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320, Orizaba, Veracruz,
México

Teléfono: (272) 7244096, (272) 7244016 Fax: 7251728 e-mail:

orizaba@itorizaba.edu.mx



www.itorizaba.edu.mx

Índice General

Resumen	1
Abstract	2
Introducción General	3
Capítulo I.....	4
Dinámica de Sistemas y TRIZ	4
1.1 Conceptos básicos de Dinámica de Sistemas	4
1.1.1 Componentes básicos de un modelo de Dinámica de Sistemas.....	5
1.1.2 Simulación de modelos de Dinámica de Sistemas.....	8
1.1.3 Metodología de Dinámica de Sistemas	11
1.2 Conceptos básicos de TRIZ	14
1.2.1 Contradicciones físicas y técnicas	15
1.2.2 Análisis Campo – sustancia (SFA).....	18
Conclusión del capítulo I	20
Capítulo II	21
Planteamiento del problema.....	21
2.1 Situación del problema.....	21
2.2 Objetivo General.....	25
2.2.1 Objetivos Específicos.....	25
2.3 Hipótesis	26
2.4 Justificación.....	26
2.5 Estado del arte	28
2.5.1 Resolución de problemas inventivos mediante TRIZ	28
2.5.2 Aplicación de Dinámica de Sistemas en problemas de innovación.....	31
2.5.3 Síntesis del estado del arte.....	33
Conclusión del capítulo II.....	37
Capítulo III.....	38
Arquetipos inventivos.....	38
3.1 Arquetipos inventivos.....	38
3.1.1 Caso 1: Acción contraria.....	39
3.1.2 Caso 2: Efecto combinado.....	40
3.1.3 Caso 3: Efecto combinado en diferentes subsistemas	41

3.1.4 Caso 4: Efecto combinado en un sistema con diferentes componentes	42
3.1.5 Caso 5: Efecto combinado con retroalimentación negativa	43
3.1.6 Caso 6: Efecto incompatible.....	44
3.1.7 Caso 7: Inacción	44
3.1.8 Caso 8: ‘Silencio’	46
3.1.9 Caso 9: Efecto excesivo	47
3.1.10 Discusión de arquetipos	48
Conclusión del capítulo III	49
Capítulo IV	50
Metodología TRIZ + DS.....	50
4.1 Creación de la metodología TRIZ + DS	50
4.1.1 Fase 1: Conceptualización	53
4.1.2 Fase 2: Análisis de contradicciones	55
4.1.3 Fase 3: Desarrollo de la simulación	56
4.2 Implementación de la metodología TRIZ + DS	57
4.2.1 Aplicación de la fase 1	57
4.2.2 Aplicación de la fase 2	63
4.2.3 Aplicación de la fase 3	70
4.2.4 Implementación del modelo	78
Conclusión del capítulo IV	91
Capítulo V	93
Metodología SFA + DS.....	93
5.1 Creación de la metodología SFA + DS.....	93
5.1.1 Aplicaciones de SFA	94
5.1.2 Metodología SFA + DS	95
5.2 Caso de estudio	97
5.2.1 Descripción: Identificar elementos.....	97
5.2.2 Formulación: Desarrollo de diagramas.....	100
5.2.3 Evaluación: Simular el modelo programado	104
5.2.4 Aplicación: Encontrar soluciones	108
Conclusión del capítulo V	121
Conclusiones generales	122
Recomendaciones y trabajo futuro	123

Anexos.....	124
Anexo A. Productos académicos: Journals.....	124
A comparison between the Functional Analysis and the Causal-Loop Diagram to model inventive problems	124
The evaluation of conceptual design through dynamic simulation: A proposal based on TRIZ and system Dynamics.....	125
Anexo B. Productos académicos: Congresos internacionales	126
Application of the Systems Dynamics Approach to Model Inventive Problems	126
An approach to solve inventive problems based on the Substance - Field Analysis and System Dynamics.....	127
Anexo C. Productos académicos: Capítulos de libro	128
System Dynamics Modeling and TRIZ: A Practical Approach for Inventive Problem Solving	128
Integration of Design Thinking and TRIZ Theory to Assist a User in the Formulation of an Innovation Project.....	129
Referencias documentales	130

Índice de figuras

Figura 1.1 Analogía de la Dinámica de Sistemas con el llenado de un recipiente	6
Figura 1.2 Ejemplo ilustrativo del lago.....	8
Figura 1.3 Diagrama de Forrester de la contaminación de un lago	10
Figura 1.4 Representación gráfica del modelo del lago	10
Figura 1.5 La resolución de una contradicción física	16
Figura 1.6 Proceso de solución de un problema mediante TRIZ.....	17
Figura 1.7 Ejemplo de SFM	19
Figura 2.1 Estructura básica de un diagrama causal	22
Figura 2.2 Ejemplo de diagrama causal.....	23
Figura 2.3 Diagrama de Forrester de una población.....	23
Figura 3.1 Acción contraria.....	39
Figura 3.2 Efecto combinado	40
Figura 3.3 Efecto combinado en diferentes subsistemas.....	41
Figura 3.4 Efecto combinado en un sistema con diferentes componentes.....	42
Figura 3.5 Efecto combinado con retroalimentación negativa.....	43
Figura 3.6 Efecto incompatible.....	44
Figura 3.7 Inacción.....	45
Figura 3.8 Silencio	46
Figura 3.9 Efecto excesivo	47
Figura 4.1 Integración de contradicciones a la Dinámica de Sistemas	52
Figura 4.2 Etapas de la metodología TRIZ+DS	53
Figura 4.3 Variables principales del objeto	58
Figura 4.4 Patentes por año desde 1970.....	60

Figura 4.5 Componentes del objeto 1.....	61
Figura 4.6 Componentes del objeto 2.....	61
Figura 4.7 Diagrama causal (CLD)	62
Figura 4.8 Contradicción física	64
Figura 4.9 Fragmento de la matriz de contradicciones	69
Figura 4.10 Diagrama de Forrester.....	71
Figura 4.11 Incremento de área	74
Figura 4.12 Decremento del área	74
Figura 4.13 Análisis de la eficiencia de la función.....	75
Figura 4.14 Primer escenario.....	76
Figura 4.15 Segundo escenario.....	76
Figura 4.16 Interfaz del modelo de simulación	77
Figura 4.17 Gráfica representativa de contradicción técnica	79
Figura 4.18 Arquetipos de Dinámica de Sistemas	80
Figura 4.19 Primera simulación de la contradicción técnica.....	81
Figura 4.20 Pantalla numérica.....	82
Figura 4.21 Segunda simulación de la contradicción técnica.....	83
Figura 4.22 Primera simulación de la contradicción física.....	84
Figura 4.23 Segunda simulación de la contradicción física	85
Figura 4.24 Primera propuesta de diseño conceptual.....	87
Figura 4.25 Solución de la primera propuesta	88
Figura 4.26 Segunda propuesta de diseño	88
Figura 4.27 Solución de la segunda propuesta de diseño.....	89
Figura 5.1 Partes físicas de un marcador.....	98
Figura 5.2 Diagrama Causal del marcador	99
Figura 5.3 Diagrama de Forrester del marcador	100
Figura 5.4 Las principales funciones útil del objeto	101

Figura 5.5 Modelado campo – sustancia (SFM)	103
Figura 5.6 Comparación de usos del objeto	105
Figura 5.7 Representación del primer diseño conceptual	109
Figura 5.8 Consumo de tinta del primer diseño conceptual	109
Figura 5.9 Límite máximo de consumo del primer escenario	110
Figura 5.10 Representación del segundo diseño conceptual	111
Figura 5.11 Dimensiones de la reserva de tinta	111
Figura 5.12 Consumo de tinta del segundo diseño conceptual	112
Figura 5.13 Límite máximo de consumo del segundo escenario	113
Figura 5.14 Representación del tercer diseño conceptual	113
Figura 5.15 Límite máximo de consumo del tercer escenario	114
Figura 5.16 Comparación gráfica de los diseños conceptuales	115
Figura 5.17 Diseño conceptual combinado	116
Figura 5.18 Consumo de tinta del diseño conceptual combinado	116

Índice de tablas

Tabla 1.1 Representación de las variables dinámicas	7
Tabla 2.1 Síntesis del estado del arte	34
Tabla 2.2 Comparación de ventajas entre Dinámica de Sistemas y TRIZ	36
Tabla 3.1 Nomenclatura de arquetipos	39
Tabla 4.1 Metodología de Dinámica de Sistemas	51
Tabla 4.2 Fase de definición	55
Tabla 4.3 Análisis de contradicciones	56
Tabla 4.4 Desarrollo del modelo de simulación dinámica.....	57
Tabla 4.5 Descripción de las características	58
Tabla 4.6 Análisis AHP	59
Tabla 4.7 Recursos	65
Tabla 4.8 Contradicciones Técnicas.....	68
Tabla 4.9 Regresión lineal múltiple del porcentaje de área.....	71
Tabla 4.10 Regresión lineal múltiple del porcentaje de portabilidad	72
Tabla 4.11 Comparación entre diseños conceptuales.....	89
Tabla 4.12 Porcentajes de mejora	90
Tabla 5.1 Comparación entre diferentes enfoques	95
Tabla 5.2 Metodología SFA + DS.....	96
Tabla 5.3 Conflictos inventivos del SFM	104
Tabla 5.4 SFM y sus respectivas soluciones estándar	107
Tabla 5.5 Prueba estadística t - pareada (parte 1)	118
Tabla 5.6 Prueba estadística t - pareada (parte 2)	118

Resumen

La Teoría de Resolución de Problemas Inventivos (TRIZ) está basada en el conocimiento extraído de la evolución de los sistemas técnicos, el conocimiento científico y la capitalización del conocimiento de varias áreas. A pesar de la capacidad de TRIZ para resolver problemas inventivos, carece de tres competencias:

- 1) TRIZ no cuenta con una herramienta para analizar la causalidad entre las variables más importantes de un problema inventivo.
- 2) No es capaz de darle seguimiento a la transformación de un sistema a través del tiempo.
- 3) TRIZ no cuenta con la capacidad de analizar las relaciones ocultas entre los diferentes conflictos en un sistema para determinar el conflicto inventivo correcto a resolver y el camino de resolución más adecuado.

Sin embargo, existe un enfoque técnico para explorar el comportamiento de un sistema que puede contribuir a solucionar las limitaciones de TRIZ: La simulación continua con el enfoque de la Dinámica de Sistemas. Este proyecto de tesis demuestra la viabilidad de combinar ambos enfoques para producir una nueva herramienta de resolución de problemas inventivos, particularmente con problemas que cuentan con contradicciones físicas y técnicas, así como aquellos problemas modelados a través de la interacción de un conjunto de funciones. Para demostrar la factibilidad de esta sinergia se muestran dos casos de estudio: El primero que propone una metodología que engloba el análisis de contradicciones a través de la Dinámica de Sistemas y el segundo que demuestra la capacidad de combinar el Análisis Campo – Sustancia (SFA) con el enfoque de la simulación continua. Ambos casos de estudio permiten analizar la resolución de problemas inventivos a través del tiempo utilizando la simulación dinámica.

Abstract

The Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) is based on the knowledge extracted from the evolution of technical systems, scientific knowledge, and knowledge capitalization from various areas. Despite TRIZ's ability to solve inventive problems, it lacks three competencies:

- 1) TRIZ does not have a tool to analyze the causality between an inventive problem's most important variables.
- 2) It is not able to track the transformation of a system over time.
- 3) TRIZ cannot analyze the hidden relationships between the different conflicts in a system to determine the correct inventive conflict to resolve and the most appropriate resolution path.

However, there is a technical approach to exploring the behavior of a system that can help solve the limitations of TRIZ: The continuous simulation with the System Dynamics approach. This thesis project demonstrates the feasibility of combining both techniques to produce a new inventive problem-solving tool, particularly with problems that have physical and technical contradictions and those modeled through a set of functions. This thesis project shows two case studies to demonstrate the feasibility of this synergy: The first proposes a methodology that encompasses the analysis of contradictions through Systems Dynamics. The second demonstrates the ability to combine the Substance - Field Analysis (SFA) with the continuous simulation approach. Both case studies allow analyzing inventive problem solving over time using dynamic simulation.

Introducción General

En este documento se describen las bases teóricas de la investigación titulada “Modelación dinámica de problemas inventivos orientada a la resolución simultánea de conflictos”. Este proyecto describe una sinergia entre dos técnicas: la Dinámica de Sistemas (DS) y la Teoría de Resolución de Problemas Inventivos (TRIZ).

El propósito de esta sinergia es crear los siguientes beneficios: (1) ofrecer al proceso de modelación con dinámica de sistemas una serie de herramientas para resolver los conflictos, que con frecuencia se localizan en un sistema. (2) Ofrecer a la Teoría de Resolución de Problemas Inventivos un mecanismo para modelar conflictos, así como el análisis temporal de las complejas relaciones subyacentes a un problema inventivo. De este modo, ambos enfoques de resolución de problemas resultarán beneficiados.

Es necesario subrayar que hasta el día de hoy ambas técnicas son aplicadas independientemente para resolver problemas en la ingeniería e investigación, sin embargo, en este trabajo se demostrará su complementariedad y el potencial para crear una sinergia de un campo de aplicación emergente, que permitirá al usuario resolver problemas complejos y con ello, tener un apoyo adicional en la toma de decisiones generando un importante aporte al conocimiento.

Capítulo I

Dinámica de Sistemas y TRIZ

En las últimas décadas la sociedad ha pasado por un proceso largo y complejo de globalización, el cual ha abarcado diversos sectores en la sociedad, como lo es el político, social, cultural y desde luego el tecnológico. En este último es posible observar que cotidianamente emergen nuevas técnicas y/o herramientas científicas para enfrentar los problemas que van surgiendo en la sociedad. Durante este desarrollo técnico y científico, surgen algunas herramientas o técnicas que son producto de la combinación de una o más técnicas clásicas. Para el desarrollo de este proyecto se presenta la creación de una sinergia entre dos técnicas: Se utiliza la **Dinámica de Sistemas (DS)** enfocándola a la resolución simultánea de conflictos mediante la **Teoría de Resolución de Problemas de Inventiva (TRIZ)**. Las secciones siguientes ofrecen una perspectiva concisa sobre estas técnicas.

1.1 Conceptos básicos de Dinámica de Sistemas

La Dinámica de Sistemas (DS) es utilizada para el desarrollo de este proyecto, ya que el pensamiento sistémico aplicado mediante el programa de simulación Stella® es lo que sustenta el desarrollo de la herramienta de simulación orientada a la resolución simultánea de conflictos. La **Dinámica de Sistemas** es definida por su creador, Jay Forrester, como *“la técnica para analizar y modelar el comportamiento temporal en entornos complejos. Se basa en la identificación de los bucles de realimentación entre los elementos, y también en las demoras en la información y materiales dentro del sistema”* [Forrester, 1961].

Cuando se aplica esta técnica para estudiar los sistemas complejos, se diferencia de las demás por el análisis de los efectos en los bucles (ciclos de retroalimentación en términos de flujos y depósitos). El objetivo de la Dinámica de

Sistemas es comprender las causas estructurales que conducen a un cierto comportamiento. Esto implica aumentar el conocimiento sobre el papel de cada elemento del sistema y ver cómo diferentes acciones, efectuadas sobre algún componente o subsistema, acentúan o atenúan las tendencias de comportamiento implícitas.

El análisis sistémico, al tener un enfoque metodológico, *“le permite al ingeniero identificar rápidamente los elementos esenciales de una problemática. Aunque no es una característica única del enfoque sistémico, es su enfoque global y de identificación de las interrelaciones entre elementos involucrados en una problemática, lo que lo hace diferente”* [Cedillo y Sánchez, 2008].

Este método resulta muy eficaz cuando se trata de entender el comportamiento global del fenómeno estudiado, de este modo, el análisis sistémico es una herramienta inicial que se vuelve un buen complemento de otras metodologías más operativas (principalmente de optimización local). Al tener en cuenta los continuos intercambios entre los elementos de una problemática y el medio o contexto en el que se desarrolla, se comprenden mejor las interrelaciones. Como herramienta de ayuda a la toma de decisiones es muy útil cuando se trata de **problemas complejos evolucionando con respecto al tiempo.**

1.1.1 Componentes básicos de un modelo de Dinámica de Sistemas

Cuando se estudian los sistemas complejos surgen problemas en dos niveles diferentes: el micronivel que se interesa en las relaciones causa y efecto, y el macronivel, el cual estudia las relaciones entre los sistemas elementales.

De este modo, un modelo de Dinámica de Sistemas tiene diversos componentes con características diferentes: Si varía en función del tiempo se le conoce como **“variable”** y si permanece constante se le llama **“parámetro”** o **“tasa”**.

Para entender mejor el funcionamiento de la Dinámica de Sistemas se puede hacer una analogía con un tanque de agua que se llena y se vacía, de modo que las **variables de estado o nivel** se les considera contenedores del flujo, las cuales

constituyen el conjunto de variables cuya evolución es importante para el estudio del sistema. Estas varían su nivel dependiendo de los **flujos de entrada y salida**, es decir, las “válvulas” que controlan los flujos por unidad de tiempo.

Las válvulas están abiertas en función de las “tasas” o “parámetros” y pueden no variar a lo largo del tiempo de simulación si quedan predeterminadas en el escenario inicial, o variar a través del tiempo en función de las **variables auxiliares** que pueden fluctuar y tienen como función representar pasos intermedios para la determinación de las variables de flujo a partir de las variables de nivel. Finalmente, existen los **retardos**, los cuales simulan retrasos del tiempo durante la simulación.

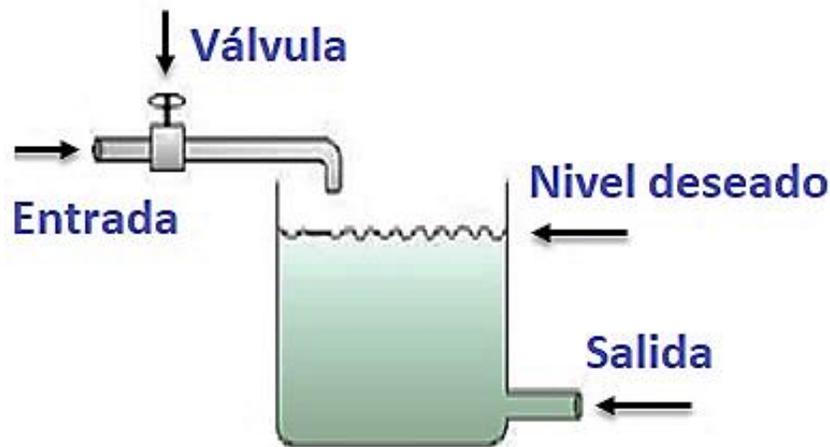


Figura 1.1 Analogía de la Dinámica de Sistemas con el llenado de un recipiente

Fuente: Reporte de Instrumentación industrial [Sánchez, Máxima, 2012]

Respecto a la simbología gráfica utilizada en los modelos de simulación dinámica, es similar en los diferentes softwares que ofrecen la posibilidad de modelar este tipo de situaciones. A continuación, se mostrarán dichos íconos en la siguiente tabla, los cuales fueron realizados mediante el software Stella ®:

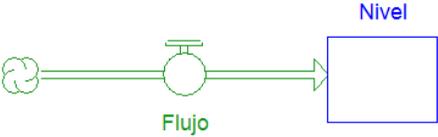
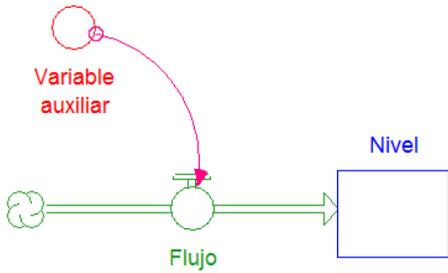
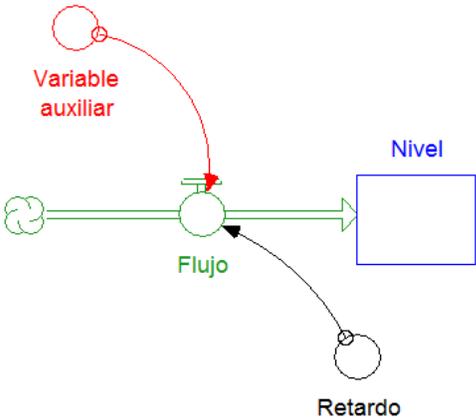
Tipo de variable	Formato en lenguaje informático
Variables de nivel o estado (personas, productos, agua, etc.)	<p style="text-align: center;">Nivel</p> 
Variables de flujo o transferencia (personas por día, productos por minuto, etc.)	
Variables auxiliares	
Retardos	

Tabla 1.1 Representación de las variables dinámicas

Fuente: Análisis de sistemas dinámicos industriales [Cedillo y Sánchez, 2008]

1.1.2 Simulación de modelos de Dinámica de Sistemas

La lógica matemática que sustenta una simulación dinámica está dada por el comportamiento de un modelo en un instante dado ($t + \Delta t$) el cual se encuentra determinado por la situación en el instante anterior (t) más la variación de los parámetros producida en un intervalo de tiempo (Δt). Dicho de otro modo, se puede representar de la siguiente manera:

$$NIV(t + \Delta t) = NIV(t) + \Delta t(FENT - FSAL)$$

En donde:

$NIV(t + \Delta t)$ = Nivel en el instante ($t + \Delta t$)

$NIV(t)$ = Nivel en el instante t

$FENT$ = Flujo de entrada por unidad de tiempo durante el intervalo t

$FSAL$ = Flujo de salida por unidad de tiempo durante el intervalo t

Para describir el comportamiento de un sistema, se muestra un ejemplo en donde se aprecia el manejo del lenguaje informático y de las matemáticas aplicadas en la Dinámica de Sistemas.

Ejemplo: La contaminación de un lago [Martínez, 2016]

Suponga que existe un cierto lago de volumen constante, de manera que los flujos de entrada y salida son constantes como se muestra en la siguiente figura:

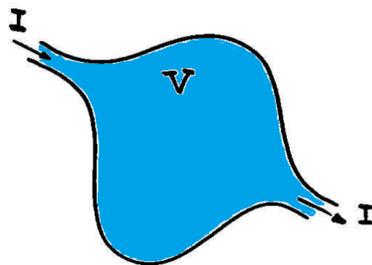


Figura 1.2 Ejemplo ilustrativo del lago

Fuente: Dinámica de Sistemas con aplicaciones [Martínez, 2016]

Supóngase que el lago ya se encuentra contaminado (alguien vertió un contaminante desde una orilla del lago), de manera que por el flujo de entrada solo fluye agua limpia, y por el flujo de salida sale agua contaminada. Además, suponga que la contaminación está distribuida homogéneamente por todo el lago, esto significa que todo punto del lago tiene la misma concentración de contaminante. Partiendo de lo anterior, se desea estudiar la evolución dinámica de la concentración de contaminante en el lago con las hipótesis mencionadas. Para esto, se definen las siguientes variables:

$$V = \text{Volumen del lago (m}^3\text{)}$$

$$I = \text{Flujo de entrada y de salida } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$$

$$P(t) = \text{Volumen de la contaminación del lago en el tiempo } t \text{ (m}^3\text{)}$$

$$y_t = \frac{P(t)}{V(t)} = \text{Concentración del contaminante}$$

Para este problema, la variable de estado es el volumen de contaminante, que irá disminuyendo a través del tiempo en virtud de que el lago ya está contaminado y que la contaminación fluirá por el flujo de salida. El flujo de contaminante que sale del lago será proporcional al flujo de salida, y el factor de proporción es justamente la concentración de polución.

Considérense los siguientes datos numéricos:

$$V = 10^6 \text{m}^3$$

$$I = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 84600 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$P(0) = \frac{3}{10} \text{m}^3$$

Los datos mostrados son insertados en el programa para posteriormente comenzar la simulación.

El diagrama de Forrester en Stella® quedaría representado como:

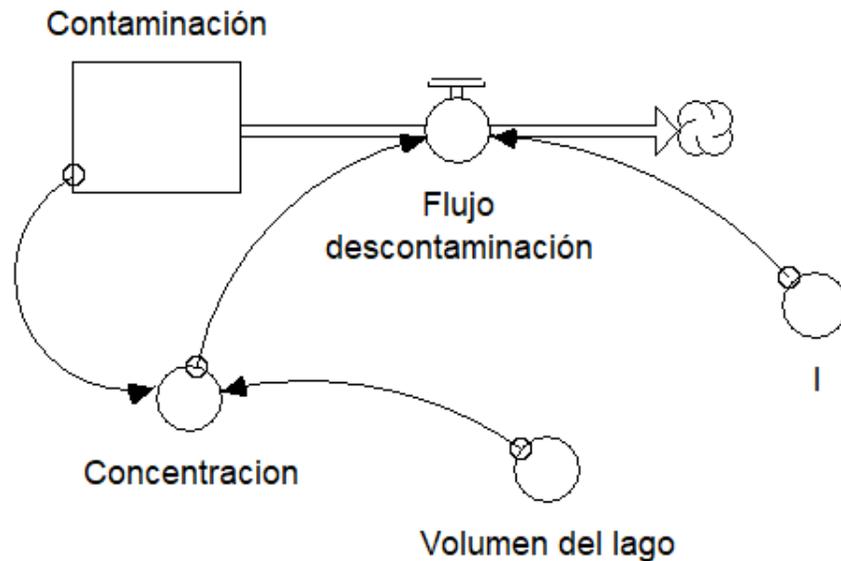


Figura 1.3 Diagrama de Forrester de la contaminación de un lago

El software tiene la capacidad de evaluar las condiciones. Para ello, ocupa gráficas que dan al usuario la capacidad de analizar visualmente lo que está ocurriendo dentro del sistema. La evolución de la concentración de contaminación, así como las ecuaciones dinámicas se muestran a continuación:

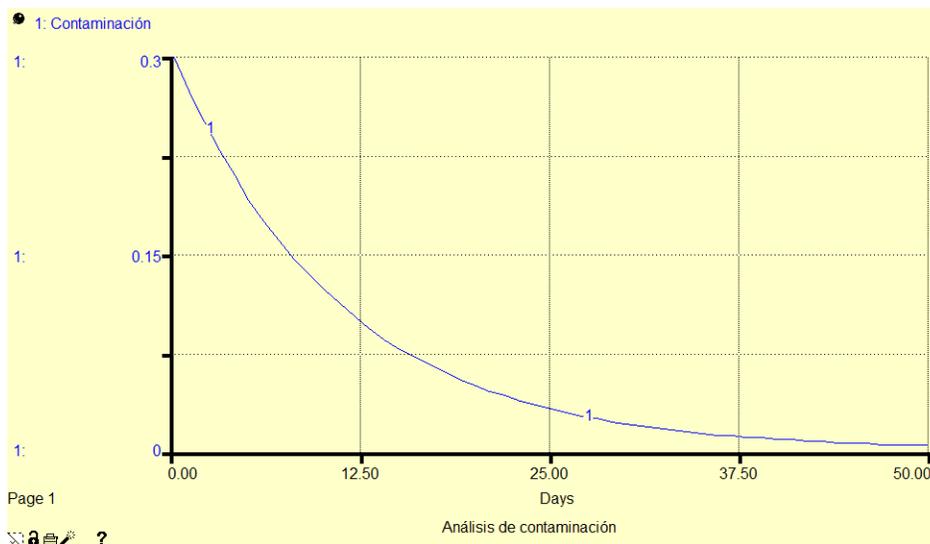


Figura 1.4 Representación gráfica del modelo del lago

Fuente: Dinámica de Sistemas con aplicaciones [Martínez, 2016]

De acuerdo a la gráfica mostrada en la figura 1.4, el nivel de concentración disminuye exponencialmente a través del tiempo. Esto indica que el lago tarda aproximadamente 50 días en purificarse del contaminante. El comportamiento se puede expresar matemáticamente a través de ecuaciones dinámicas del modelo:

$$\text{Contaminación}(t) = \text{Contaminación}(t - dt) + (-\text{Flujo contaminante}) * dt$$

$$\text{INIT Contaminación} = \frac{3}{10} (\text{metros cúbicos de contaminante})$$

$$\text{Flujo contaminante} = \text{concentración} * I \{\text{metros cúbicos de contaminante por día}\}$$

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Contaminación}}{\text{Volumen del lago}}$$

$$I = 84600 \{\text{metros cúbicos por día}\}$$

$$\text{Volumen del lago} = 10^6 \{\text{metros cúbicos}\}$$

De acuerdo al ejemplo mostrado, “la Dinámica de Sistemas permite observar el comportamiento de un conjunto de variables, sus retroalimentaciones, y acumulaciones a través del tiempo” [Forrester, 1961]; además de ser una herramienta poderosa y útil en la evaluación de políticas en sistemas complejos [Sterman, 2000].

Dado que la estructura de un sistema está definida por las relaciones que establecen las variables que la integran, se dice que su comportamiento puede analizarse con base en su estructura. Para tal fin, la Dinámica de Sistemas hace uso de los diagramas causales que serán definidos más adelante.

1.1.3 Metodología de Dinámica de Sistemas

Para llevar a cabo la modelación es importante la formulación matemática, es decir, se deben definir las ecuaciones diferenciales que pueden representar el comportamiento evolutivo del sistema estudiado. Para la modelización se recomiendan tres etapas fundamentales:

- 1) A partir del diagrama causal se eligen las variables que sean de acumulación (variables de estado).
- 2) Responder a las siguientes preguntas: ¿Cuáles son los flujos que llenan o vacían estas variables de estado?
- 3) Identificar de qué dependen los flujos esquematizados (variables de información o material) así como el tiempo que define las influencias positivas y negativas.

El modelo dinámico que de este proyecto está programado a través de la interfaz del paquete de software Stella®, por lo que se basa en la simulación dinámica, originando que se pueda tener una visión continua de todo lo que ocurre mientras las variables interactúan. Existe una metodología en Dinámica de Sistemas propuesta por [Sterman, 2000] y [Cedillo y Sánchez, 2008] para un mejor análisis. Este proyecto de tesis se fundamenta en ella, a continuación, se muestran las diversas etapas:

Etapa 1: Definición del problema y conceptualización del modelo.

- 1) Selección del escenario.
- 2) Definir el propósito del modelo.
- 3) Identificar las variables críticas.
- 4) Establecer el horizonte del tiempo.
- 5) Establecer las relaciones entre variables.
- 6) Formular las hipótesis dinámicas.
- 7) Elaboración del diagrama causal.

De acuerdo a lo mostrado anteriormente, durante esta etapa se realiza la definición respecto a qué se espera del modelo y qué tiempo se desea tener como referencia, enumerando las variables básicas con las cuales se puede empezar a trabajar y desde luego crear el diagrama causal observando el efecto que produce una con otra.

Etapa 2: Construcción del modelo formal.

- 1) Construir el diagrama de Forrester
- 2) Establecer las ecuaciones matemáticas
- 3) Estimar los valores numéricos de los parámetros y variables
- 4) Probar la consistencia interna del modelo, así como de las hipótesis dinámicas.

Una vez teniendo el modelo causal se trabaja en la parte analítica de la metodología, ya que el objetivo es modelar la parte matemática del sistema, es decir, a través del diagrama de Forrester se analizan las ecuaciones diferenciales del modelo. Estas ecuaciones representan el análisis matemático a través del tiempo del modelo de simulación.

Etapa 3: Evaluación.

- 1) Probar la congruencia en el comportamiento del modelo bajo condiciones extremas.
- 2) Comparar la estructura y comportamiento del modelo con la realidad
- 3) Realizar análisis de sensibilidad y documentar las respuestas.

Para respaldar y validar el modelo creado es necesario evaluarlo mediante diversos escenarios, los cuales pueden ser reales o hipotéticos, mismos que darán como resultado analizar la lógica del mismo y validarlo. Además, la sensibilidad es de gran importancia para evaluar los cambios producidos dentro del sistema.

Etapa 4: Mejora del diseño e Implementación.

- 1) Observar y analizar el comportamiento del modelo bajo diferentes escenarios.
- 2) Presentar el modelo en una forma accesible al usuario.

La etapa final permite obtener una mejora en los modelos que se plantean, además de que Stella® tiene la posibilidad de evaluar diferentes escenarios en los modelos a través de su interfaz, lo cual permite explorar áreas de naturaleza más compleja.

Una vez que se ofreció una breve perspectiva sobre la Dinámica de Sistemas, la sección siguiente describe de manera concisa los fundamentos de la teoría TRIZ.

1.2 Conceptos básicos de TRIZ

La innovación “es la introducción en el mercado de nuevos productos o servicios; o la implantación de nuevos métodos de producción, organización o comercialización; o la modificación sustancial de los mismos, que impactan favorablemente en la competitividad de la organización [Glosario de términos del Premio Nacional de Tecnología, 2021].

Con frecuencia, cuando se está llevando al cabo el proceso de la innovación surgen problemas durante la invención de productos y servicios. Estos conflictos resultantes pueden ser resueltos mediante la teoría TRIZ propuesta por el inventor y escritor ruso Genrich Altshuller durante la década de 1940. Su teoría ha tenido gran repercusión ya que incluye una metodología práctica, herramientas, base de conocimientos y tecnología basada en modelos abstractos para generar nuevas ideas y soluciones para la resolución de problemas.

Los fundamentos de TRIZ explican que los problemas y soluciones se repiten en todas las industrias y ciencias, ya que los patrones de evolución tecnológica son similares en ellas. Además, con frecuencia las innovaciones se basan en el uso de los conocimientos científicos fuera del ámbito en el que se han desarrollado, por lo que a la hora de utilizar TRIZ se aplican estos fundamentos para crear y mejorar productos, servicios y sistemas [Altshuller, 2005], [Imoh, 2013], [Cheng et al., 2011].

Este proyecto de tesis tiene entre sus alcances resolver **contradicciones** durante el proceso de inventiva, ya que con frecuencia se presentan durante la innovación; además, establecer una relación entre Dinámica de Sistemas y una herramienta propia de TRIZ: el **análisis campo-sustancia** (SFA). El concepto de contradicción y del análisis campo sustancia se definirán en las siguientes subsecciones.

1.2.1 Contradicciones físicas y técnicas

Un problema inventivo es un problema que contiene al menos una contradicción. Con la finalidad de comprender un poco más la naturaleza de este tipo de problemas, es necesario definir el significado de una contradicción en el contexto de la teoría TRIZ. Altshuller afirmó con respecto a las invenciones y a las contradicciones que “desde el punto de vista de la ingeniería, una invención manifiesta siempre la superación completa o parcial de una **contradicción**” [Altshuller, 2005]. Esencialmente, la identificación, formalización y finalmente la supresión de una contradicción es el proceso más eficaz para crear (pero no el único). De manera general y desde la perspectiva de TRIZ, una contradicción surge cuando en un sistema, la tentativa por mejorar un cierto parámetro ocasiona la degradación inaceptable de otro parámetro también útil y viceversa [Cortés et al., 2019]. Existen dos tipos esenciales de contradicciones: la contradicción técnica y la contradicción física. Sin embargo, existen otros tipos de contradicciones que han sido identificados.

Contradicción física: Esta contradicción exige la existencia simultánea de dos estados mutuamente exclusivos, correspondientes a una función o componente del sistema. Ejemplo de ello son piezas del sistema que deben ser lisas y rugosas al mismo tiempo; frías y calientes; suave y duro, etc. Este tipo de contradicciones son resueltas utilizando los principios de separación (en el tiempo, en el espacio, entre el todo y sus partes, o bajo condiciones) [Altshuller, 1986].

Ejemplo: Durante la construcción de grandes edificios, es frecuente la necesidad de insertar en el suelo pilares y barras de metal para reforzar la resistencia mecánica de una estructura. La contradicción física que se manifiesta es la siguiente: “Es necesario que el pilar termine en una punta para facilitar la inserción. Sin embargo, al mismo tiempo es necesario que el mismo pilar termine en una base más ancha

que el resto del pilar para incrementar la resistencia mecánica. La figura siguiente muestra este conflicto y su solución:

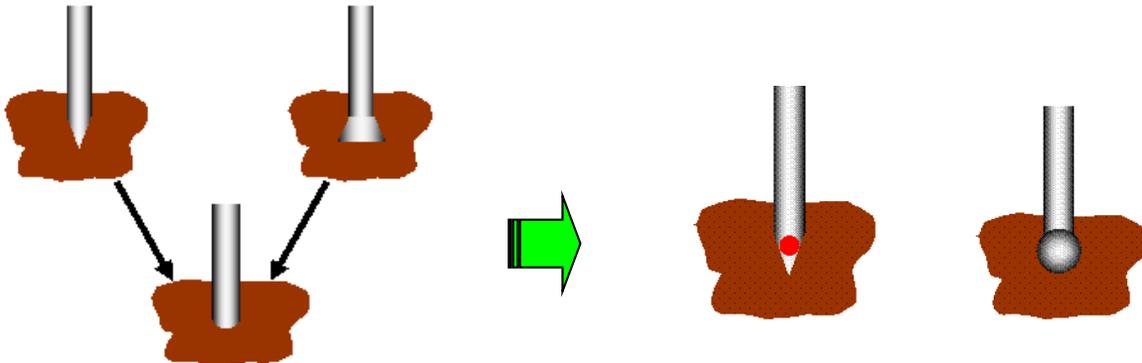


Figura 1.5 La resolución de una contradicción física

Fuente: [Fey y Rivin, 2005]

La solución consiste en que se coloca una carga expansiva en el pilar que será detonada cuando el pilar este en la posición de trabajo deseada. Esto genera que la solución sea tomada a partir del principio de separación en el tiempo. De este modo el pilar presenta dos estados diferentes en tiempos diferentes.

Contradicción técnica: Es un tipo de contradicción donde, la mejora de un parámetro o característica útil de un sistema, provoca la degradación de otro parámetro o característica también útil y viceversa. Este tipo de contradicciones son resueltas mediante la Matriz de Resolución de Contradicciones Técnicas (MRC) [Altshuller, 1997].

Ejemplo: Durante la carga y descarga de un avión es necesaria una grúa. Sin embargo, este mecanismo aumenta el peso total del avión, lo cual demanda un motor más potente, es decir, existe una contradicción entre la necesidad de realizar una función y el peso del avión.

De acuerdo a [Cortés et al., 2019], Altshuller descubrió durante el análisis de patentes, que varias invenciones habían resuelto el mismo problema en diferentes sectores tecnológicos. A través de su observación, encontró que las mismas

soluciones habían sido empleadas en las distintas disciplinas y en diferentes épocas. Lo anterior implica que el problema fundamental que caracterizaba esas invenciones era idéntico y había sido resuelto de la misma forma. Por ello, Altshuller llegó a la conclusión que, si los inventores que habían enfrentado a un mismo problema, hubieran conocido la solución con antelación, la resolución de su problema hubiera tomado menos tiempo y esfuerzo. Debido a este descubrimiento, Altshuller formuló la idea de que, el contenido de esas invenciones podría ser extraído, indexado y generalizado a manera de volverlo accesible a los inventores de cualquier disciplina técnica. Esta reflexión dio nacimiento a la primera base de conocimientos de la innovación [Zlotin et al., 1999].

Existe una gran cantidad de usuarios de TRIZ, los cuales han demostrado que la aplicación de las soluciones identificadas ha sido eficiente durante el proceso de resolución de una contradicción. Además, pueden ser usadas con éxito en problemas “similares” y durante este proceso se incrementa radicalmente la eficiencia del diseño de sistemas y productos. Una vez que un problema ha sido formulado como una contradicción, existen algunos métodos para resolverla. Estos métodos están evolucionando rápidamente y son cada vez más accesibles. La clave para comprender por qué la innovación puede sistematizarse, es comprender la existencia de soluciones comunes entre las bases mundiales de patentes [Terninko et al., 1998]. La siguiente figura respalda lo mencionado anteriormente.

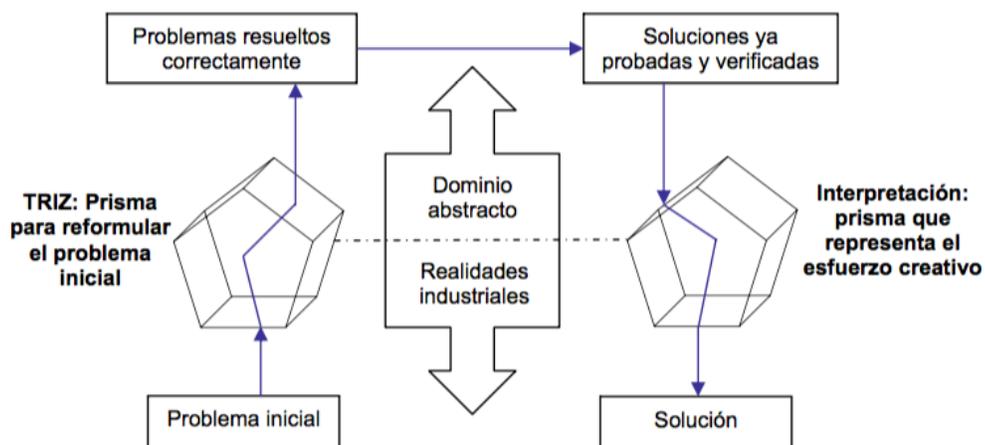


Figura 1.6 Proceso de solución de un problema mediante TRIZ

Fuente: [Cavallucci, 1999]

1.2.2 Análisis Campo – sustancia (SFA)

Por su parte el Análisis Campo – Sustancia (SFA) es una herramienta perteneciente a TRIZ capaz de modelar problemas relacionados con los sistemas tecnológicos existentes. Según [Altshuller, 1999], cada sistema realiza al menos una función útil. El término “utilidad” está vinculado al hecho de que el sistema cumple con el propósito de diseño para el que fue creado. A su vez, el término "sustancia" se utiliza para describir un objeto de cualquier grado de complejidad. Las sustancias representan objetos materiales, físicos o del sistema de manera indistinta [Altshuller, 1984]. El medio de interacción de sustancias se denomina "campo". El concepto de "campo" tiene diferentes definiciones [Altshuller, 1984], [Salamatov, 1999] y [Savransky, 2000]. Según [Bultey et al., 2015] el término "campo" no se define por su intención (conjunto de atributos formales), sino por su extensión (conjunto de objetos formales: mecánico, químico, térmico, gravitacional y campo magnético).

A su vez, el Modelado de Campo de Sustancia (SFM) consiste en uno o más gráficos orientados que describen cómo las funciones de cada componente dan forma a un sistema. El SFM formula problemas a través de una función o mediante la interacción de múltiples funciones. A veces, la función describe un problema donde el conocimiento disponible no conduce a una satisfactoria solución, produce un punto muerto o, simplemente, hay una falta de conocimiento para lograr un resultado deseado. Para hacer frente a esta situación, existe un conjunto de reglas genéricas llamadas 76 soluciones estándar. Una solución estándar permite al usuario encontrar una ruta inicial efectiva para abordar el problema de manera más eficiente.

Según [Altshuller, 2007], la creación de un modelo fundamental de campo – sustancia implica dos sustancias y un campo, o bien dos campos y una sustancia. La creación de un SFM consta de cuatro etapas: (1) la identificación de los componentes; (2) la construcción del modelo; (3) la identificación de la correlación

del modelo con al menos una de las 76 soluciones estándar, y (4) el desarrollo de al menos un concepto de solución que valida su viabilidad [Terninko et al., 1998], [Helfman et al., 2015]. El SFA tiene varias ventajas sobre otras herramientas inventivas: (1) permite la creación de modelos simples basados en ideas de bases de conocimiento; (2) permite representar sistemas complejos a través de modelos simples; (3) facilita la construcción de modelos a través de funciones, y (4) muestra al usuario la relación entre sustancias y campos. La figura 1.7 muestra un ejemplo de SFM enfocado a la función que realiza un martillo demoledor (sustancia S_2) al perforar una roca (sustancia S_1) y su relación con la vibración (campo F) que produce el mismo. La imagen refleja que un nivel de vibración indeseado, generará que el martillo fragmente inadecuadamente la roca; dando como resultado que varios fragmentos de ella sean lanzados al aire. La nomenclatura del SFM se verá más detalladamente en los capítulos posteriores.

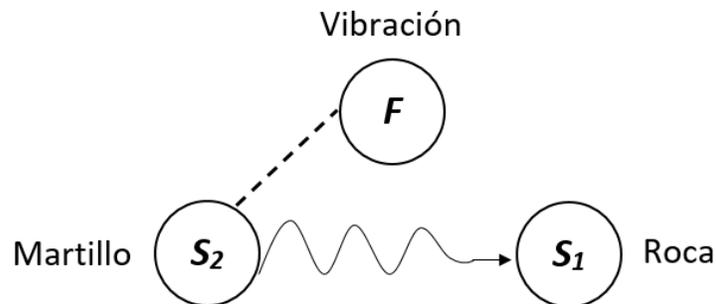


Figura 1.7 Ejemplo de SFM

Fuente: [Terninko et al., 1998]

Conclusión del capítulo I

En este primer capítulo se describieron brevemente las dos técnicas en las cuales se basa esta tesis: Dinámica de Sistemas y TRIZ. Se mostraron los enfoques de cada herramienta y la aplicación de ambas, así como cuáles son los tipos de problema que son capaces de resolver.

Se mostró que Dinámica de Sistemas crea modelos de simulación dinámica que permiten representar sistemas medidos respecto al tiempo, comenzando desde la concepción del diagrama causal hasta la creación de la interfaz del modelo que permite al usuario manipularlo para después efectuar una toma de decisiones.

De igual forma, se presentó que TRIZ resuelve contradicciones que surgen durante la inventiva. Se mostraron los dos principales tipos de contradicción: Físicas y técnicas, así como las características de cada una de ellas. A su vez, se dio una breve descripción del análisis del campo – sustancia (SFA) y de su modelado (SFM) ya que en los siguientes capítulos se mostrarán metodologías que engloban a TRIZ y Dinámica de Sistemas mediante estas herramientas descritas.

Capítulo II

Planteamiento del problema

En este capítulo se realiza una descripción de la problemática general, la cual incluye los objetivos, justificación e hipótesis de este trabajo de investigación. Así mismo, se presenta el estado de arte realizado que da soporte a la aportación que busca este trabajo de tesis.

2.1 Situación del problema

Cuando se está llevando a cabo el proceso de resolución de un problema inventivo, el nivel de evolución de un producto o servicio no es uniforme, sino que se ve alterado por diversos factores. La problemática actual ha permitido observar que cuando un producto y/o servicio evoluciona, no siempre sus componentes lo hacen a la misma velocidad, provocando una inestabilidad en los eslabones del sistema. De igual forma, a veces al tratar de modificar una de las variables dentro de los componentes se modifica positiva o negativamente otro de ellos aparentemente independiente, pero debido a que todo es parte de un solo sistema, una variable repercute en otra generando que la más pequeña modificación en una parte afecte al resto.

La explicación se fundamenta en que la Dinámica de Sistemas está basada en bucles de balanceo y retroalimentación, representados en los diagramas causales. Un Diagrama Causal de Bucles (CLD), en su forma más simple, está formado por lo que se conoce como un grafo orientado, donde una flecha representa el vínculo causal entre las variables que conecta, y donde dicho vínculo posee una polaridad que denota el tipo de influencia, ya sea positiva o negativa [Donado-Campos, 2005]. Lo expuesto anteriormente puede expresarse mediante el siguiente diagrama causal:

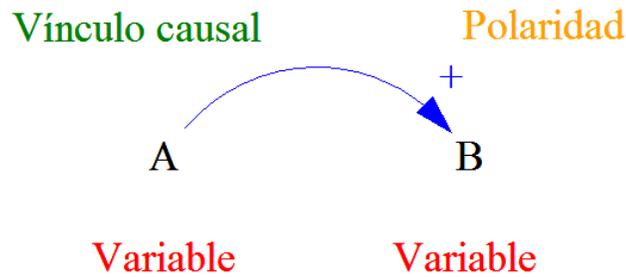


Figura 2.1 Estructura básica de un diagrama causal

La figura 2.1 representa la estructura básica de un diagrama causal, donde existe un vínculo o relación de influencia positiva entre la variable A y la variable B. Esto quiere decir que, si la variable A se incrementa, la variable B también lo hará; y, por el contrario, si la variable A disminuye, así mismo lo hará B. Por otra parte, si la influencia fuera negativa; si la variable A se incrementara, la variable B disminuiría; y, por el contrario, si la variable A disminuyera, la variable B aumentaría.

Cuando diferentes variables se asocian utilizando la estructura básica del grafo orientado con signo, se pueden presentar ciclos entre ellas, formando bucles. Los bucles son estructuras básicas en el estudio del comportamiento de un sistema. Estos proporcionan una transmisión de información circular de forma continua, dando origen a comportamientos complejos. Los bucles son identificados como positivos o negativos. Se consideran positivos cuando el número de relaciones es par, y negativos si es impar. Cabe mencionar que los bucles negativos llevan a los modelos hacia una situación de estabilidad y los positivos tienden a desestabilizar al sistema [Rendón, 2013].

La figura 2.2 muestra un ejemplo desarrollado de un diagrama causal, con sus respectivos bucles. Se utiliza un ejemplo clásico de Dinámica de Sistemas para entender el pensamiento dinámico: el análisis de una población. Consiste en el análisis del comportamiento de una población de cierta ciudad. Para este análisis

se considera una tasa de nacimientos y de defunciones, las cuales afectan directamente a la población y la vuelven un sistema dinámico.

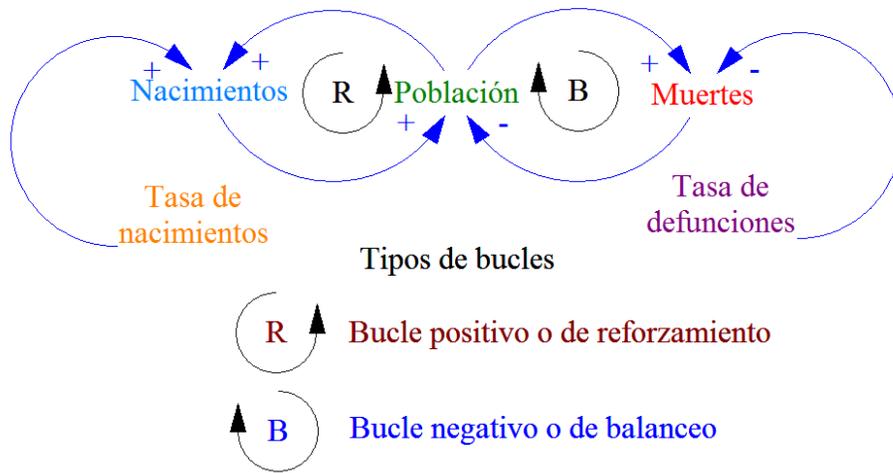


Figura 2.2 Ejemplo de diagrama causal

Fuente: Adaptado de [Sterman, 2000]

Si se traduce el diagrama causal al Diagrama de Forrester, el cual es una simple transcripción de las causalidades a ecuaciones diferenciales, se obtiene una representación como la que se ilustra en la figura 2.3.

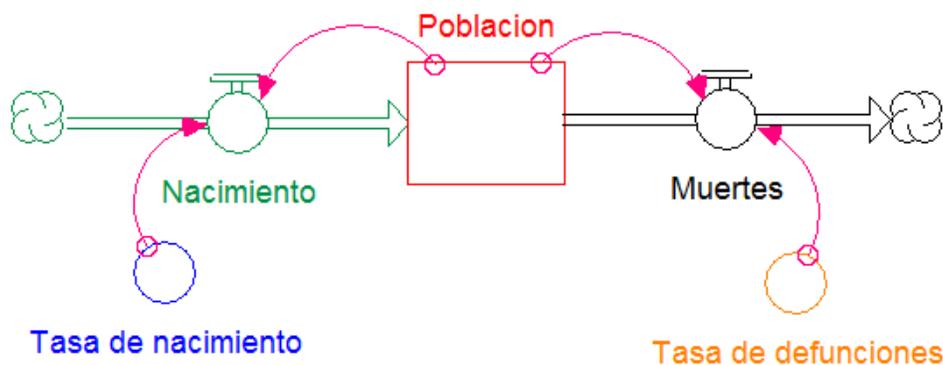


Figura 2.3 Diagrama de Forrester de una población

Los diagramas anteriores son básicos para modelar los sistemas donde se representan los problemas de inventiva, ya que en ellos se modelarán las relaciones

entre variables y permitirán crear simulaciones del sistema para ver el comportamiento temporal de conflictos inventivos. A pesar de que la modelación con Dinámica de Sistemas ha sido aplicada con éxito para representar el comportamiento de un sistema, este enfoque no dispone de un proceso formal de resolución de problemas de innovación [Kindström et al., 2013], lo cual representa el aporte principal de este trabajo de tesis.

Actualmente, las empresas se enfrentan a un mercado caracterizado por una creciente facilidad para aceptar nuevos productos y servicios. Esta evolución en los mercados, ha modificado radicalmente el proceso de desarrollo de nuevos productos y servicios. Existe una marcada tendencia hacia ciclos de vida cada vez más cortos en los productos y servicios; viéndose reflejada en la existencia de demandas cada vez más específicas dentro de un mercado globalizado [King y Burgess, 2006] y [Love et al., 2014].

La gestión de la innovación trata de resolver esta dinámica generando un ambiente que permita sistematizar el proceso de innovación, y de este modo, permita a una organización obtener la capacidad de satisfacer las necesidades del mercado y prever la evolución empresarial.

La innovación se considera generalmente como una actividad creativa, sin embargo, se percibe con frecuencia como un fenómeno aleatorio e incontrolable. Por esto es necesario desarrollar un enfoque que permita desplegar sistemáticamente el proceso de creación de nuevos productos y servicios. En el horizonte industrial actual, la teoría **TRIZ permite abordar eficientemente la problemática inherente a la gestión de la innovación.**

A pesar de ser uno de los enfoques más efectivos para resolver problemas inventivos (también llamados problemas de innovación), la teoría TRIZ no dispone de una herramienta formal para analizar de manera dinámica las relaciones o comportamientos que existen en un sistema o sus componentes [Tan et al., 2009],

[Fey y Rivin, 2005], [Jung y Lewis, 2011]. En consecuencia, al combinar ambos enfoques, puede crearse una sinergia muy efectiva para resolver los problemas intrínsecos al proceso de innovación.

2.2 Objetivo General

Desarrollar e implementar una metodología que integre la Dinámica de Sistemas con la teoría TRIZ, para proponer un proceso de resolución nuevo que facilite la modelación y resolución de los múltiples problemas que contiene el proceso inventivo.

2.2.1 Objetivos Específicos

- 1) Analizar las variables críticas durante el proceso de innovación y la importancia de TRIZ en la resolución de problemas inventivos para identificar ventajas y limitaciones.
- 2) Identificar los diferentes procesos de estructuración de un modelo causal y de la aplicación de la Dinámica de Sistemas para identificar ventajas y limitaciones.
- 3) Proponer un marco de trabajo para integrar ambos enfoques de resolución de problemas, con la finalidad de conservar las ventajas de TRIZ y Dinámica de Sistemas para superar sus limitaciones.
- 4) Desarrollar mediante la herramienta de simulación continua Stella ® una interfaz que permita analizar y modificar las variables críticas de interés para observar los cambios a través de diversos modelos usando la sinergia de TRIZ y Dinámica de Sistemas.

5) Implementar una estrategia de toma de decisiones a partir de los modelos de simulación, con la finalidad de solucionar los conflictos durante el proceso de inventiva en un producto y/o servicio.

2.3 Hipótesis

A través de la integración de Dinámica de Sistemas y la teoría TRIZ, es posible producir una sinergia entre ambas herramientas. Esta sinergia tiene el potencial de generar un proceso de resolución que permite representar múltiples conflictos, observar sus relaciones y facilitar el proceso de decisión sobre la mejor vía de resolución a emprender. Además, con la integración entre TRIZ y Dinámica de Sistemas será posible predecir los cambios que ocurren con respecto al tiempo y con ello tomar decisiones eficientemente.

2.4 Justificación

Un sistema es un grupo de unidades combinadas que forman un todo organizado y cuyo resultado es mayor que el resultado que las unidades podrían tener si funcionaran independientemente [Chiavenato, 1989]. De acuerdo con [Cedillo y Sánchez, 2008] *“Contrariamente a la lógica cartesiana o analítica, en las cuales se razona una problemática mediante división en partes más pequeñas para entender el todo, la lógica sistémica tiene un enfoque de análisis global donde el comportamiento de cada elemento depende de su interacción con el resto. El comportamiento de un sistema en su conjunto es diferente a la suma de comportamientos aislados de cada uno de los elementos que lo componen”*.

El objetivo de la Dinámica de Sistemas es comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento de un sistema. Esto implica aumentar el conocimiento sobre el efecto de cada elemento del mismo y ver cómo diferentes acciones, efectuadas sobre partes del sistema, acentúan o atenúan las tendencias de comportamiento [Cedillo y Sánchez, 2008].

Existen algunas características importantes en la Dinámica de Sistemas a tomar en cuenta. Una de ellas es que la técnica no pretende predecir detalladamente el comportamiento futuro, es decir, en realidad estudia el sistema y a través del ensayo de diferentes políticas en el modelo, el resultado final es más preciso. Por otro lado, se trata de un enfoque a largo plazo, entendiéndose por tal un período lo bastante amplio, que permita observar todos los aspectos significativos de la evolución del sistema.

Los componentes de un sistema durante el proceso de inventiva poseen variables que se relacionan de una u otra manera entre sí, por lo cual, la Dinámica de Sistemas es la técnica que mejor se adapta para resolver este tipo de conflictos. Así mismo, la Dinámica de Sistemas le permite al usuario encontrar y desarrollar mediante un modelo de simulación una estrategia para hacer frente a los conflictos que surgen durante la inventiva.

La justificación de este proyecto de tesis se expone desde el punto de vista tecnológico y científico; y surge debido a que existe una necesidad de crear nuevo conocimiento para lograr la resolución efectiva de un problema inventivo [Altshuller, 2005]. Actualmente, la Dinámica de Sistemas no cuenta con una herramienta de apoyo capaz de resolver conflictos inventivos, por lo que se ve obligada a buscar alguna técnica con capacidad de otorgarle esa ventaja, y TRIZ es una alternativa que ha demostrado su eficacia en diferentes dominios tecnológicos.

A su vez, TRIZ no cuenta con una herramienta capaz de modelar matemáticamente los conflictos que enfrenta durante el proceso de inventiva. Además, la teoría de TRIZ establece que cada conflicto o problema se resuelve uno a uno tan pronto se va presentando, por lo que no es capaz de resolverlos de manera simultánea y su mecanismo de solución no permite evaluar el comportamiento a través del tiempo. Por ello, TRIZ no es capaz de modelar sistemas temporales como lo lleva a cabo la Dinámica de Sistemas. Por lo anterior, TRIZ también se beneficia con la integración de Dinámica de Sistemas.

De acuerdo a lo descrito, la unión de ambas técnicas genera un nuevo aporte al conocimiento, enfocado a la resolución de problemas de inventiva. Esto se debe a que produce una simbiosis que da como resultado que ambas técnicas crezcan entre sí, originando una oportunidad para la investigación.

2.5 Estado del arte

El estado del arte se ha dividido en dos partes debido a que este proyecto se basa en las dos técnicas mencionadas con anterioridad. Primero se muestran los trabajos relativos a la técnica de TRIZ y su aplicación en la resolución de contradicciones y en el campo – sustancia. Posteriormente se presentan trabajos relativos a Dinámica de Sistemas enfocados a la innovación mediante la simulación dinámica. Finalmente se muestra una tabla comparativa de diversos autores donde se comparan características comunes entre unos y otros.

2.5.1 Resolución de problemas inventivos mediante TRIZ

Desde su creación en la década de los 40's, se ha incrementado el uso de TRIZ en diversas áreas del conocimiento. TRIZ cuenta en su caja de herramientas con el estudio de contradicciones físicas y técnicas, el análisis de tendencias de evolución y el análisis de campo-sustancia (SFA). Diversos autores han usado estas herramientas para la resolución de problemas inventivos.

[Pokhrel et al., 2015] aplican y adaptan la matriz de contradicciones en diversas industrias de procesos químicos (CPI) ajustándola a los problemas más frecuentemente encontrados en la ingeniería de procesos con el fin de ampliar su aplicabilidad a los problemas típicos, además proponen catorce nuevas características y ocho principios inventivos obtenidos como resultado del análisis de artículos. En lo que se refiere a SFA, [Bultey, Yan y Zanni, 2015] implementan la técnica asistida por computadora, implicando una fase ontológica que conduce a la

traducción del conocimiento terminológico y condicional del SFA en un lenguaje informático. La importancia de su aporte radica en que la comunidad de TRIZ ha informado regularmente sobre la complejidad de la aplicación de SFA. La terminología de la SFA sufre de una falta de normalización y el despliegue de estándares es un proceso empírico por lo que proponen una aclaración de la terminología del modelado del campo – sustancia y un proceso sistemático para desplegar las 76 soluciones estándar. Finalmente [Yoon y Kim, 2012] proponen un método que automatiza la identificación de las tendencias de evolución de TRIZ. El método propuesto consiste en (1) extraer relaciones binarias de las formas 'adjetivo + sustantivo' o 'verbo + sustantivo' de patentes usando un procesamiento de lenguaje natural, (2) definir una base de reglas para la identificación de tendencias y (3) determinar las tendencias y fases de tendencia específicas midiendo la semántica entre las relaciones binarias de las patentes y las relaciones binarias en la base de reglas. La salida final del método representa el potencial evolutivo como un diagrama de radar normalizado, que se puede utilizar como entrada para la predicción de tecnología basada en tendencias de evolución de TRIZ. Algunos otros autores que utilizan TRIZ en la solución de problemas de inventiva son:

Chang Y, Chien Y, Yu k et al [2016]: Utilizan un análisis multivariado de covarianza (MANCOVA) para analizar los efectos de TRIZ en los procesos creativos de un grupo de 121 estudiantes y con ello encontraron que TRIZ tiene un efecto fuertemente positivo en la capacidad de un estudiante para analizar problemas, y generar estrategias de solución.

Chunlong, W, Youcheng, Z, Pereira, M, Peng, Q, Tan, R [2020]: Presentan un método para el modelado conceptual de un gemelo digital basado en un marco de gemelo digital de cinco dimensiones para representar la compleja relación entre los objetos gemelos digitales y sus atributos. El método propuesto se utilizó para modelar el gemelo digital de un vehículo inteligente a nivel de concepto. Este método está basado en el modelado de funciones de TRIZ.

Ekmekci I, Koksai M [2015]: Compararon la metodología TRIZ con otras técnicas en lo que se refiere a resolver problemas de creatividad e innovación.

Fiorineschi L, Saverio F, Rissone P et al [2015]: Presentan una comparación entre el TRIZ Clásico y el OTSM-TRIZ (General Theory of Power Thinking - TRIZ) para evaluar las diferencias en el uso de cualquiera de los dos métodos cuando se enfrentan a problemas complejos.

Gronauer B, Naehler H [2016]: Muestran las ventajas de implementar TRIZ con el fin de motivar a los miembros del personal a desarrollar productos creativos e innovadores.

Hussein K, Ishak M, Sapuan S, Yidris N [2020]: Desarrollaron y eligieron el diseño conceptual óptimo de un brazo transversal de acuerdo a los requerimientos del diseño del producto, con especial énfasis en incluir la madera en el diseño del componente. Durante la generación inicial de la solución, se utilizaron la matriz de contradicciones TRIZ y 40 principios inventivos de ella.

Jung Y, Lewis J [2011]: Describen un nuevo modelo para acelerar el diseño preliminar del producto en la eco-innovación, integrando las ventajas del razonamiento basado en casos y el método TRIZ.

Mansoor M, Mariun N, Izzri N [2017]: Presentan diversas maneras de modelar problemas relacionados con techos verdes a través de diferentes herramientas de TRIZ, usando los principios inventivos y direcciones de soluciones inventivas.

Wessel W, Vaneker T [2011]: Combinan las técnicas de TRIZ y el modelado Function-Behavior-Structure (FBS) para resolver conflictos de interfaces a un bajo nivel de abstracción. Las estrategias de resolución del conflicto se aplicaron mediante una interfaz con éxito en un estudio de caso industrial.

Zahra F, Rasovskab I, Duboisc S et al [2017]: Aplican TRIZ en problemas de Green Supply Chain (GSC) identificando nuevos retos de investigación centrados en la pregunta: "¿En qué medida es necesario desarrollar herramientas TRIZ, métodos y fundamentos teóricos para abordar los problemas inventivos de GSC?" Los resultados del experimento muestran las limitaciones del uso del TRIZ en los problemas inventivos del GSC, que no habían sido descritos anteriormente.

Cabe resaltar que se tomaron en cuenta otros trabajos de diversos autores, pero solamente se describieron los más relevantes. Los otros trabajos se verán más adelante en la tabla 2.1

2.5.2 Aplicación de Dinámica de Sistemas en problemas de innovación

La Dinámica de Sistemas ha sido aplicada en diversas ramas de la ingeniería. Su campo de aplicación radica en la creación de modelos continuos para simularlos con respecto al tiempo. Existen varios trabajos en donde se ha usado Dinámica de Sistemas para dar solución a problemas de innovación, mas no de inventiva.

Por citar algunos trabajos, [Xue et al., 2017] analizan los factores que influyen en la capacidad de innovación provenientes de las Tecnologías de Información (TI) en una empresa, así como las relaciones de lógica interna entre ellos. Establecen un modelo de Dinámica de Sistemas en factores de influencia evaluando la capacidad innovadora de las TI y utilizando el software Vensim PLE para simular el modelo. Por último, realizan y simulan diferentes pruebas cuantitativas sobre la cooperación universidad-industria, el personal e inversión de la investigación y desarrollo (I + D) empresarial. Por su parte, [Lee, Han y Park 2017] miden el desempeño funcional de un Sistema Producto – Servicio (PSS) como un sistema dinámico en el que las diversas partes interesadas logran un desempeño funcional a través de relaciones a largo plazo en una red de valor complejo. El desempeño funcional del PSS requiere un enfoque dinámico para medir su efectividad. Este trabajo aborda como caso de estudio un sistema de salud.

[Dash et al., 2010] estudian el problema de la toma de decisiones basada en el riesgo de la innovación tecnológica desde el punto de vista de un equipo emprendedor. En su trabajo, identifican las diferencias entre la toma de decisiones del equipo y un problema tradicional de toma de decisiones con el enfoque individual, donde las decisiones se ven afectadas principalmente por las percepciones y preferencias de riesgo.

Se llevó a cabo un modelado donde se utilizó la teoría de la Dinámica de Sistemas desde la perspectiva del modelado basado en agentes. El enfoque propuesto es validado por un caso de estudio en la toma de decisiones sobre riesgo de innovación tecnológica en una empresa automotriz china.

Algunos otros autores que utilizan Dinámica de Sistemas en la solución de problemas de innovación son:

Chena H, Yub J, Wakelandb W [2016]: Utilizan un modelo de difusión de innovación implementado mediante simulación continua (Dinámica de Sistemas) para efectuar un vínculo entre previsión y planificación dentro de las empresas.

Chena H, Wakelandb W, Yuc J [2012]: En este artículo se propone un enfoque de prospectiva tecnológica en dos etapas. Durante la primera etapa, las tecnologías críticas son identificadas y evaluadas por expertos nacionales a través de encuestas basadas en el método Delphi. En la segunda etapa, se utiliza un modelo de simulación de Dinámica de Sistemas para estimar cómo los parámetros críticos pueden impactar en el logro de los objetivos de prospectiva y planeación.

Juin-Ming T, Shiu-Wang H [2019]: Proponen la difusión de la innovación para la telesalud utilizando un modelo de Dinámica de Sistemas. Los resultados indican que la tecnología de telesalud ya se encuentra en una etapa madura y que la promoción de políticas y las demandas del mercado son los principales factores en la mejora de la difusión. Además, también proponen cinco tipos de pronósticos de escenarios para la difusión de la telesalud durante los próximos 15 años, así como

sugerencias que pueden brindar orientación para la planificación tecnológica y la toma de decisiones.

King F, Burgess T [2006]: Presentan un nuevo modelo de ERP que se basa en trabajos ya existentes de innovación y en las ideas de simulación con el fin de comprender mejor las relaciones entre los factores críticos de éxito y con ello fomentar la exploración de estrategias de aplicación más adecuadas.

Walrave B, Raven R [2016]: Desarrollan un modelo de Dinámica de Sistemas que integra el concepto de los motores de la innovación basados en sistemas emergentes de innovación tecnológica, con la noción de "vías de transición" que se desarrolló como parte del pensamiento de múltiples niveles.

Wei F, Haizhong A, Huajiao L et al [2017]: Utilizan Dinámica de Sistemas para la creación de un modelo que analiza al sistema eco-económico urbano que incluye sub modelos económicos, de población y sub sistemas aplicados en el análisis del desarrollo sostenible de Beijing bajo diferentes escenarios.

Al igual que en la sección 2.5.1 únicamente se describieron los trabajos más representativos de la búsqueda del estado del arte.

2.5.3 Síntesis del estado del arte

El resumen del estado del arte, de acuerdo con las secciones anteriores, se muestra en la tabla 2.1 en la cual se lleva a cabo una comparación entre TRIZ y Dinámica de Sistemas mostrando las ventajas de cada una de ellas en su aplicación como técnicas independientes. No se encontró un artículo que englobe Dinámica de Sistemas, simulación y TRIZ aplicado a resolver problemas inventivos, lo que genera el sustento e importancia de esta tesis doctoral.

Autor	Capacidad para modelar sistemas	SFA	Mecanismos de resolución	Múltiples dominios	DS	TRIZ	I+D	Simulación
(Chunlong, 2020)	X	-	X	X	-	X	X	-
(Hussein, 2020)	-	-	X	-	-	X	X	-
(Asyraf, 2019)	X	-	X	X	-	X	-	-
(Tawanda, 2020)	X	-	-	-	X	-	X	X
(Juin-Ming, 2019)	X	-	X	X	X	-	X	X
(Self, 2019)	-	-	X	X	-	X	-	-
(Hwang 2018)	-	-	X	-	-	X	-	X
(Delgado, 2018)	X	-	X	X	X	X	X	-
(Noor, 2018)	-	-	X	X	-	X	X	-
(Liu, 2017)	X	-	-	-	-	X	X	-
(Mansoor, 2017)	-	-	X	X	-	X	X	-
(Santos, 2017)	X	-	X	X	X	-	X	-
(Kwon, 2017)	X	-	-	-	X	-	-	X
(Xue, 2017)	X	-	X	-	X	-	X	X
(Zahra, 2017)	X	-	X	X	-	X	X	-
(Ko, 2017)	X	-	X	X	-	X	X	-
(Lu 2017)	X	-	-	X	X	-	-	X
(Rena, 2017)	X	-	X	X	X	-	-	X
(Wang F, 2017)	-	-	X	X	-	X	-	-
(Tiuc, 2017)	X	-	X	X	-	X	X	-
(Wei 2017)	X	-	X	X	X	-	-	X
(Fujjia, 2017)	-	-	X	X	X	-	-	-
(Fansong, 2017)	X	-	-	X	X	-	-	X
(Gronauer, 2016)	-	-	X	X	-	X	X	-
(Spreafico, 2016)	-	-	X	X	-	X	-	-
(Chang 2016)	-	-	-	-	-	X	X	-
(Chena, 2016)	X	-	X	X	X	-	-	X
(Vigants, 2016)	-	-	X	X	-	-	X	-
(Wook, 2016)	X	-	X	-	X	-	X	X
(Walrave, 2016)	X	-	X	-	X	-	-	-
(Ekmekci (2015)	-	-	X	X	-	X	X	-
(Fiorineshi, 2015)	X	-	X	X	-	X	X	-
(Ash, 2015)	X	-	X	X	-	-	X	X
(Blazsek, 2015)	-	-	-	X	-	-	X	-
(Bultey, 2015)	X	X	X	X	-	X	-	-
(Dawid, 2015)	X	-	X	-	-	-	X	-
(Guseo, 2015)	X	-	X	X	-	-	-	-
(Grüneisen, 2015)	X	-	X	X	X	-	X	-
(Helfman, 2015)	X	X	X	X	-	X	-	-
(Lambertini, 2015)	-	-	-	-	-	-	X	-
(Nazidzaji, 2015)	X	X	X	X	-	X	-	-
(Omer, 2015)	X	-	X	-	-	-	X	-
(Pokhrel, 2015)	X	-	X	X	-	X	X	-
(Raymond, 2015)	X	-	X	-	-	-	X	-
(Stummer, 2015)	X	-	X	X	-	-	X	X
(Timmer, 2015)	X	-	X	-	X	-	X	X
(Wang D, 2015)	X	-	X	-	-	X	X	-
(Zhou, 2015)	X	-	-	-	-	-	X	X
(Lin, 2014)	X	-	X	X	-	-	X	X
(Zheng, 2014)	X	-	X	-	-	X	X	-
(Kreng, 2013)	X	-	X	X	X	-	X	X
(Yan, 2013)	X	X	X	X	-	X	-	-
(Chena, 2012)	X	-	X	X	X	-	-	X
(Samara, 2012)	X	-	X	-	X	-	X	X
(Chen, 2011)	X	X	X	X	-	X	-	-
(Jing-Li, 2011)	X	-	X	-	-	-	X	X
(Wessel, 2011)	X	-	X	-	-	X	X	-
(Dash, 2010)	X	-	X	-	X	-	X	X
(Shimomura, 2010)	X	-	X	-	-	-	X	-
(Lee, 2010)	X	-	X	X	-	-	X	-
(Martins, 2009)	X	-	X	-	-	-	X	X
(Evren, 2003)	X	-	X	-	-	-	X	X
PROPUESTA DOCTORAL	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabla 2.1 Síntesis del estado del arte

Los tres trabajos más relacionados con este tema de tesis son los escritos por [Timma et al, 2015], [Kreng et al, 2013] y [Samara et al, 2012] que se describen brevemente a continuación:

Outlining Innovation Diffusion Processes in Households Using System Dynamics. Case Study: Energy Efficiency Lighting [Timma et al, 2015].

- 1) Presentan un modelo de innovación para dar soluciones a los problemas de eficiencia energética en los hogares.
- 2) El modelo creado en Dinámica de Sistemas crea simulaciones para analizar el consumo de energía eléctrica.

An innovation diffusion of successive generations by system dynamics — An empirical study of Nike Golf Company [Kreng et al, 2013].

- 1) Creación de un modelo de Dinámica de Sistemas en el cual se analiza el impacto de la innovación en un producto con el paso del tiempo.
- 2) Le dan un énfasis especial al precio de un producto prediciendo altas y bajas en la demanda del mismo.

The impact of innovation policies on the performance of national innovation systems: A system dynamics analysis [Samara et al, 2012].

- 1) Proponen un modelo de simulación dinámica con el cual se analiza el impacto en las políticas de innovación del Sistema Nacional de innovación de su país (Grecia).
- 2) Los resultados de su simulación arrojan que a largo plazo habrá un mejor rendimiento en el sistema de innovación.

Una vez realizado el estado del arte se observa que TRIZ y Dinámica de Sistemas tienen diferentes características; algunas propias y otras comunes. En la tabla 2.2

se muestran algunas ventajas presentes en ambas herramientas que les permiten abordar y dar solución a sus respectivos problemas en sus áreas específicas. Esto permite visualizar el resultado que se obtendrá al integrar ambos enfoques. La tabla 2.2 muestra que son técnicas con características complementarias; y una sinergia entre ellas genera una nueva herramienta poderosa para resolver problemas inventivos.

Ventaja	Dinámica de Sistemas	TRIZ
Modela problemas simultáneos	SI	NO
Modela problemas complejos	SI	SI
Permite resolver conflictos	NO	SI
Se enfoca a problemas de inventiva	NO	SI
Permite al usuario hacer simulación	SI	NO
Opera mediante modelos matemáticos	SI	NO
Brinda la posibilidad de estudiar funciones	SI	SI

Tabla 2.2 Comparación de ventajas entre Dinámica de Sistemas y TRIZ

A partir del estado de arte mostrado, es posible ubicar el enfoque que tendrá este documento basado en los trabajos que han sido publicados con anterioridad y servirán sus fundamentos para el desarrollo de este proyecto de tesis.

Conclusión del capítulo II

A lo largo de este capítulo se mostraron los objetivos, problemática, justificación, hipótesis y el estado del arte. Además, se mostró el horizonte y resultados del proyecto.

Cabe señalar que se hizo una búsqueda eficiente en la red, principalmente en sitios de descarga de artículos y no se encontró un trabajo idéntico al que se está realizando, ya que la búsqueda arrojó varios resultados de simulación dinámica y otros más de TRIZ, pero ninguno que se mezclaran ambas técnicas para abordar problemas inventivos, lo que sustenta la aportación original científica de este trabajo.

A partir de esta información que hasta ahora se ha presentado, se explicará en los capítulos posteriores las metodologías que conjuntarán a TRIZ con Dinámica de Sistemas para la resolución de problemas inventivos, la cual permitirá la observación y evaluación del comportamiento del sistema con el paso del tiempo y será de utilidad para la toma de decisiones.

El capítulo siguiente aborda la primera estrategia para determinar el potencial de combinar TRIZ con la Dinámica de Sistemas. Se exploran los arquetipos más comunes de TRIZ y se representan desde la óptica de la Dinámica de Sistemas con la finalidad de identificar los mecanismos para proponer un marco de trabajo que facilite el despliegue de ambos enfoques.

Capítulo III

Arquetipos inventivos

La teoría TRIZ cuenta dentro de su caja de herramientas con el SFA para modelar conflictos. El estado del arte analizado en el capítulo II muestra que no hay trabajos relacionados que utilicen Dinámica de Sistemas para la modelación de problemas inventivos mediante SFA. Este capítulo está orientado a demostrar la capacidad de modelar un problema inventivo a través de Dinámica de Sistemas tomando como base los arquetipos inventivos de [Salamatov 1999]. Estos arquetipos utilizan la nomenclatura del SFA para establecer las relaciones funcionales. Los arquetipos mostrados en este capítulo y su respectiva modelación representan el primer intento de creación de una sinergia entre el concepto de funcionalidad de TRIZ y la Dinámica de Sistemas. Estos modelos sirvieron como base y práctica para abordar el caso de estudio que se mostrará en el capítulo V, además contribuyeron como fundamentación para crear una metodología que engloba la sinergia entre SFA y Dinámica de Sistemas.

3.1 Arquetipos inventivos

[Salamatov 1999] y [Fey y Rivin 2005] describen nueve configuraciones típicas en los problemas inventivos. Estos arquetipos usan una representación gráfica para ilustrar el efecto que una variable, componente o sistema tiene en otro y son la guía para explorar la posibilidad de formular problemas mediante el modelado de Dinámica de Sistemas. A continuación, se mostrará cada caso con una breve descripción, así como tres elementos importantes: el modelo gráfico de cada conflicto, el diagrama de [Forrester 1961] y las ecuaciones diferenciales del caso de estudio. Cabe resaltar que los arquetipos mostrados no muestran una solución, solamente modelan los problemas inventivos presentados. La nomenclatura de los arquetipos se muestra en la tabla 3.1.

Análisis	Nomenclatura	Análisis	Nomenclatura
1) Aplicación		5) Efecto nefasto	
2) Efecto deseado		6) Efecto inexistente	
3) Efecto deseado insuficiente		7) Transformación del modelo	
4) Excesivo		8) Efecto incontrolado	

Tabla 3.1 Nomenclatura de arquetipos

Fuente: Adaptados de Salamatov 1999] y [Fey y Rivin 2005]

3.1.1 Caso 1: Acción contraria

Definición: "La variable A produce el efecto deseado en B (flecha sólida), pero hay una reacción negativa parcial o continua de B (flecha ondulada). Por lo tanto, es necesario mantener o aumentar el efecto positivo sobre B sin el efecto adverso".

Caso de estudio: Un aumento significativo en la potencia del motor de un vehículo de combustión exige un motor más robusto y con mayor número de cilindros generando un automóvil potente. Sin embargo, cuando la potencia aumenta, el consumo de energía, y el costo también presentan un crecimiento [Yu 2016]. Este conflicto tiene varias formulaciones: (1) El motor debe ser robusto, pero a la vez más ligero (contradicción física). (2) El motor debe aumentar su potencia, pero no aumentar su costo de operación. (3) El motor debe aumentar su potencia sin afectar el peso del automóvil. Entonces, cada situación produce una formulación de problema diferente. Sin embargo, el modelo gráfico actúa como un modelo genérico. La matriz de contradicción (que será descrita más adelante) o el conjunto de principios inventivos podrían resolver este problema.

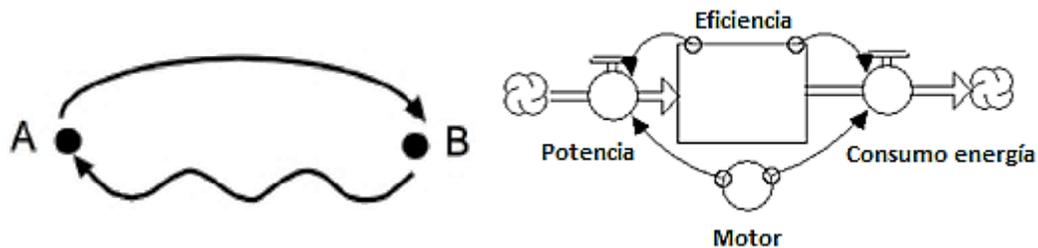


Figura 3.1 Acción contraria

$$\frac{d(E_f)}{dt} = (P - E) \Rightarrow E_f(t) = E_f(t_0) + \int_0^t (P - E) dt \quad \dots \quad (3.1)$$

En donde: E_f = Eficiencia del motor, P = Potencia y E = Consumo de energía

3.1.2 Caso 2: Efecto combinado

Definición: "El efecto útil de la variable A sobre B produce un efecto negativo simultáneo sobre B. El conflicto aparece cuando es necesario aumentar o mantener el efecto positivo, pero el efecto negativo debe ser eliminado".

Caso de estudio: La adición de cloro al agua reduce la población bacteriana. Sin embargo, una concentración alta de cloro impide que el agua sea potable, modifica el gusto, y aumenta el costo de su purificación [Sapone et al., 2016]. Por lo tanto, es indispensable garantizar el efecto positivo y evitar, simultáneamente, el efecto adverso. Las empresas utilizan carbón activado para remover el exceso de cloro del agua purificada. Esta es una contradicción física, por lo que podrían utilizarse los principios de separación; o bien, el conflicto podría ser modelado como una función y así emplear las 76 Soluciones Estándar que serán descritas más adelante.

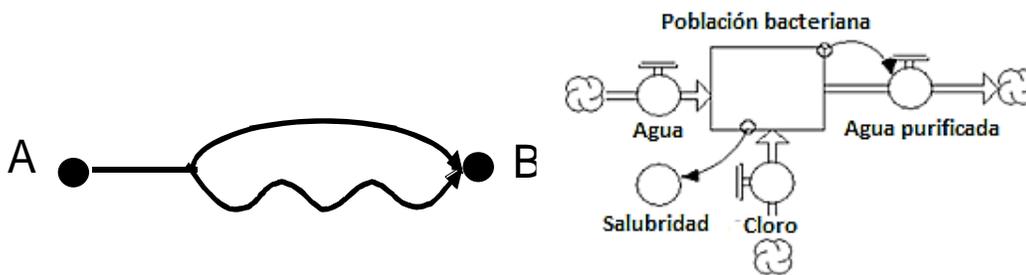


Figura 3.2 Efecto combinado

$$\frac{d(B)}{dt} = (W + C - P) \Rightarrow B(t) = B(t_0) + \int_0^t (W + C - P) dt \quad \dots \quad (3.2)$$

En donde: B = Población de bacterias, C = Porcentaje de cloro, W = Agua a ser purificada y P = Agua purificada.

3.1.3 Caso 3: Efecto combinado en diferentes subsistemas

Definición: "Esta relación causal es parecida a la anterior. El efecto de la variable A sobre B es útil en una parte o componente de B, pero perjudicial para otra parte o componente de B. Algunas acciones deben estar en su lugar para eliminar el efecto negativo sobre B2 mientras que el efecto positivo sobre B1 permanece, o se mejora."

Caso de estudio: Un medicamento antigripal tiene en su formulación sustancias activas químicas que disminuyen los síntomas de la influenza. Una de ellas es la loratadina, que reduce los síntomas; aunque, esta produce somnolencia incapacitando al paciente para ciertas actividades. Los laboratorios médicos reducen este impacto negativo reduciendo la cantidad de loratadina en el medicamento. Sin embargo, es imperativo asegurar la dosis para garantizar la función principal antigripal [Bau-mann L et al., 2014]. Este conflicto podría ser formulado a través de la contradicción técnica y potencialmente resuelto con la matriz de contradicción.

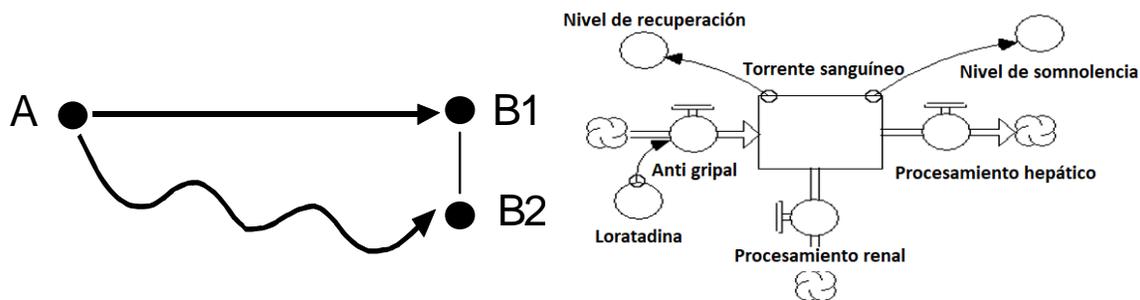


Figura 3.3 Efecto combinado en diferentes subsistemas

$$\frac{d(B)}{dt} = (A - R - L) \Rightarrow B(t) = B(t_0) + \int_0^t (A - R - L)dt \quad \dots \quad (3.3)$$

En donde: B = Flujo sanguíneo, A = Anti-gripal, R = Proceso renal y L = Procesamiento del hígado.

3.1.4 Caso 4: Efecto combinado en un sistema con diferentes componentes

Definición: "En un sistema que implica varios componentes, La variable A tiene un efecto positivo sobre B, pero produce un efecto negativo simultáneo sobre C. Es necesario eliminar o reducir el efecto negativo y preservar o mejorar el efecto útil sin dañar el sistema. "

Caso de estudio: Una cafetera tradicional eleva la temperatura del agua en un rango entre 90-95°C para extraer el sabor y la fragancia del café. Sin embargo, a esta temperatura, el usuario encuentra difícil manipular la taza [Steen et al., 2017]. Esta es una contradicción física: la temperatura debe estar cerca de 95 ° C para disfrutar de un gran café, pero simultáneamente debe ser tan baja como sea posible para sostener la taza cómodamente. Una vez más, al ser una contradicción física, los principios de separación pueden guiar el proceso de resolución.

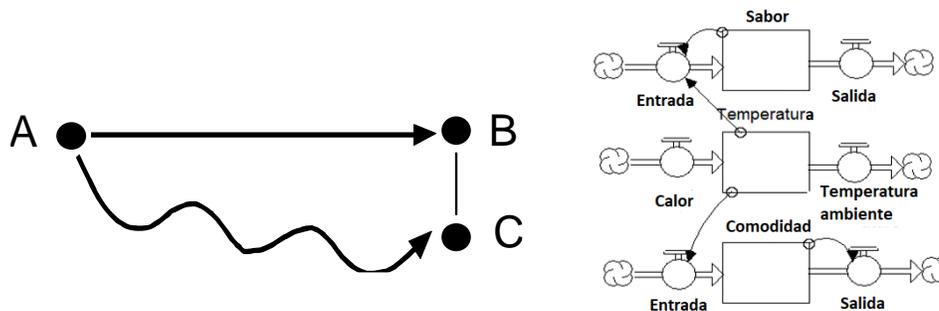


Figura 3.4 Efecto combinado en un sistema con diferentes componentes

$$\frac{d(T)}{dt} = (H - R) \Rightarrow T(t) = T(t_0) + \int_0^t (H - R) dt \quad \dots \quad (3.4)$$

$$\frac{d(F)}{dt} = (E_f - e_f) \Rightarrow F(t) = F(t_0) + \int_0^t (E_f - e_f) dt \quad \dots \quad (3.5)$$

$$\frac{d(C)}{dt} = (E_c - e_c) \Rightarrow C(t) = C(t_0) + \int_0^t (E_c - e_c) dt \quad \dots \quad (3.6)$$

En donde: E_f & E_c = Flujos de entrada de información, e_f & e_c = Flujos de salida de información, F = Sabor, R = Temperatura ambiente, H = Energía calorífica, C = Comodidad y T = Temperatura.

3.1.5 Caso 5: Efecto combinado con retroalimentación negativa

Definición: "El efecto útil de la variable A sobre B produce un efecto perjudicial sobre A. Por lo tanto, es necesario eliminar el efecto negativo, pero mantener o aumentar el efecto útil".

Caso de estudio: Una bombilla incandescente produce su función útil principal cuando la corriente eléctrica fluye a través del filamento de tungsteno para alcanzar un color blanco brillante (más de 3000 °C) [Cathie et al., 2017]. Sin embargo, al mismo tiempo que el objeto cumple su función, los filamentos de tungsteno se deterioran por la alta temperatura y gradualmente dejarán de funcionar. Esto es esencialmente una contradicción física como el caso 4. La contradicción física expone que es necesaria una temperatura alta para obtener un color blanco brillante en la bombilla, pero una temperatura baja para evitar daños.

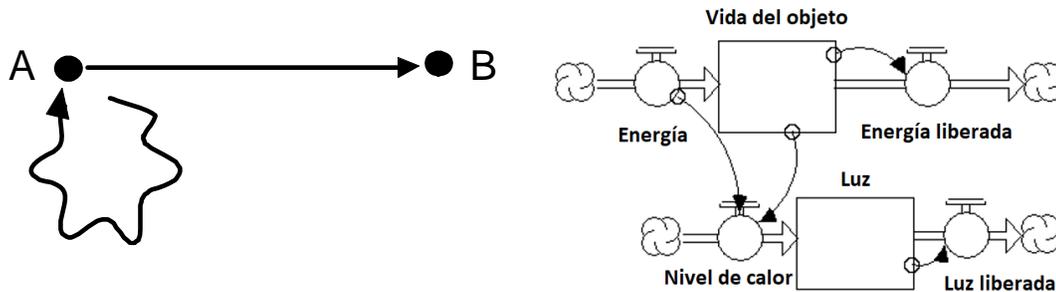


Figura 3.5 Efecto combinado con retroalimentación negativa

$$\frac{d(L_0)}{dt} = (E - E_r) \Rightarrow L_0(t) = L_0(t_0) + \int_0^t (E - E_r) dt \quad \dots \quad (3.7)$$

$$\frac{d(L)}{dt} = (H - E_h) \Rightarrow L(t) = L(t_0) + \int_0^t (H - E_h) dt \quad \dots \quad (3.8)$$

Donde. L_0 = Vida útil del objeto (bombilla) E = Energía, H = Nivel de calor, E_h = Luz liberada, E_r = Energía liberada y L = Cantidad de lúmenes.

3.1.6 Caso 6: Efecto incompatible

Definición: "El efecto útil de la variable A sobre B excluye el efecto útil de C sobre B. Es necesario proporcionar el efecto de C sobre B sin cambiar el efecto de A sobre B. Una relación mutuamente exclusiva también podría estar presente en el sistema".

Caso de estudio: La cámara de combustión de un motor produce una explosión controlada para transformar la energía de una reacción química a la energía mecánica [Broatch et al., 2017]. El combustible y el fuego (chispa de encendido) son mutuamente excluyentes en el resto del sistema (el automóvil). Este conflicto es fácilmente modelable como una función. Por lo tanto, las 76 Soluciones Estándar pueden guiar el proceso de resolución.

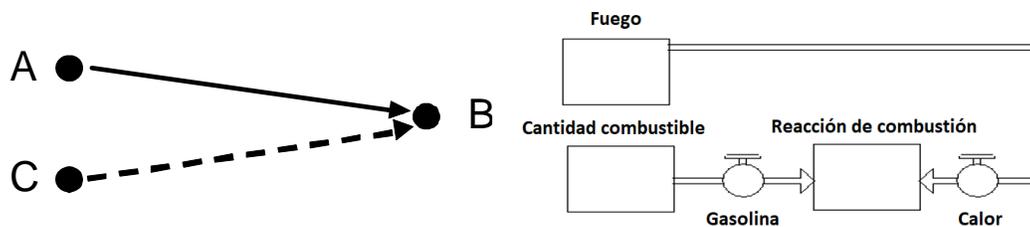


Figura 3.6 Efecto incompatible

$$\frac{d(F)}{dt} = -H \Rightarrow F(t) = F(t_0) - \int_0^t H dt \quad \dots \quad (3.9)$$

$$\frac{d(F_I)}{dt} = -G \Rightarrow F_I(t) = F_I(t_0) - \int_0^t G dt \quad \dots \quad (3.10)$$

$$\frac{d(C)}{dt} = (G + H) \Rightarrow C(t) = C(t_0) + \int_0^t (G + H) dt \quad \dots \quad (3.11)$$

En donde: F = Fuego, C = Reacción de combustión, F_I = Nivel de combustible, H = Calor y G = Gasolina.

3.1.7 Caso 7: Inacción

Definición: "Esta relación tiene varias interpretaciones. El primero es que la variable A tiene un efecto único sobre B. Sin embargo, se requieren dos efectos diferentes. La segunda interpretación explica que A no tiene el efecto deseado sobre

B; o que es necesario cambiar B, pero no se conoce el mecanismo para ejecutar la transformación. Finalmente, la relación expone que es una necesidad de proporcionar el efecto de B, pero la complejidad de A no debería aumentar. Este caso tiene tres interpretaciones. El ejemplo de la figura 2.6 representa sólo el primero, en el que A tiene un efecto único sobre B, pero la ejecución de la función exige dos efectos diferentes”.

Caso de estudio: La resina epóxica consiste en un polímero reactivo que forma una mezcla con una sustancia catalítica denominada frecuentemente como endurecedor. Ambos materiales reaccionan y crean un poliepóxido útil para proteger una superficie o un objeto, debido a sus propiedades mecánicas y resistencia química [Rolere et al., 2017]. El catalizador necesita interactuar con el polímero, pero simultáneamente, debe garantizar la proporción correcta en la mezcla para obtener los atributos de calidad apropiados. La formulación del problema corresponde a una contradicción técnica: la cantidad de sustancia frente a la exactitud de la medición. La matriz de contradicción recomienda un conjunto de principios inventivos para resolver este conflicto.

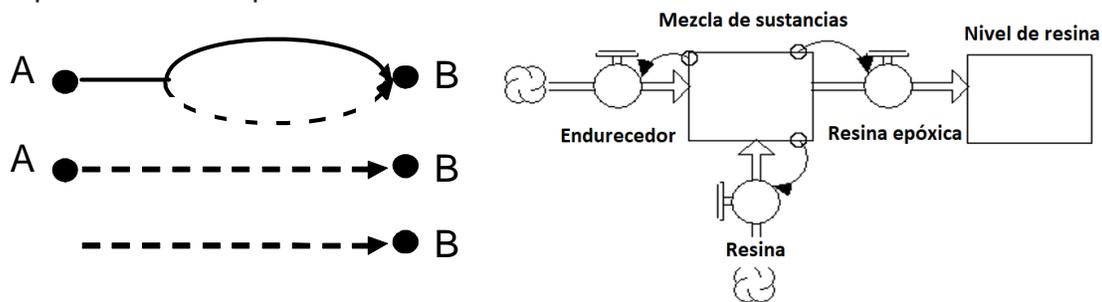


Figura 3.7 Inacción

$$\frac{d(S)}{dt} = (H + R - L) \Rightarrow H(t) = H(t_0) + \int_0^t (H + R - L) dt \quad \dots \quad (3.12)$$

$$\frac{d(L)}{dt} = E_r \Rightarrow L(t) = L(t_0) + \int_0^t E_r dt \quad \dots \quad (3.13)$$

En donde: S = Mezcla de la sustancia, H = Endurecedor, E_r = Resina Epoxica, R = Resina y L = Nivel de la resina epóxica.

3.1.8 Caso 8: 'Silencio'

Definición: "La información o interacción entre la variable A y B no existe. Es necesario un mecanismo para recopilar información o para implementar una acción útil. Esencialmente, la concepción de esta interacción es un proceso creativo".

Caso de estudio: Es muy común el uso de columnas y barras de metal en el subsuelo para ganar fuerza en las estructuras mecánicas de los edificios. La inserción de la columna en el suelo pone en evidencia un problema: la columna debe tener un extremo puntiagudo para facilitar la inserción, pero debe presentar el estado opuesto para mejorar la resistencia mecánica (ver la sección 1.2.1, figura 1.5). La transición de un estado (inserción) a otro estado deseable (forma plana) es una contradicción física, y la estrategia para ejecutar este cambio es desconocida [Fey y Rivin 2005]. En este caso, el uso del Análisis de Sustancia-Campo es deseable.

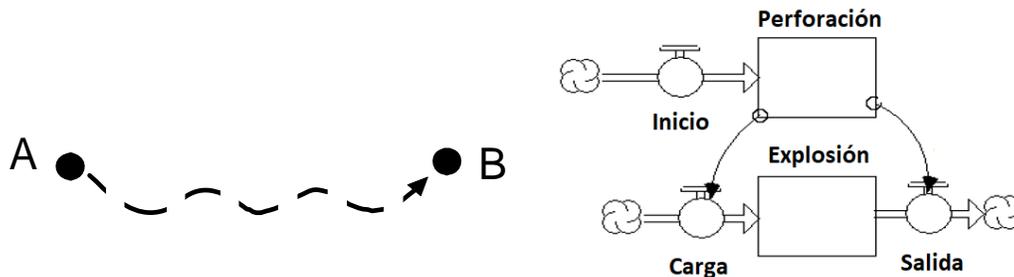


Figura 3.8 Silencio

$$\frac{d(D)}{dt} = (E_d) \Rightarrow D(t) = D(t_0) + \int_0^t (E_d) dt \quad \dots \quad (3.14)$$

$$\frac{d(E)}{dt} = (E_e - e_e) \Rightarrow E(t) = E(t_0) + \int_0^t (E_e - e_e) dt \quad \dots \quad (3.15)$$

En donde: E_d & E_e = Entrada de flujo de información, e_e = Salida de flujo de información, E = Explosión y D = Perforación.

3.1.9 Caso 9: Efecto excesivo

Definición: "El efecto de la variable A sobre B no es controlable; El proceso de control es desconocido, o el mecanismo para hacer controlable el efecto no se conoce".

Caso de estudio: El uso de Diazepam en pacientes que sufren de ansiedad es una medicación de control común. Sin embargo, una pequeña variación al alza en la dosis puede producir graves daños en el paciente e incluso desencadenar un paro cardiorrespiratorio, debido a la supresión de algunas funciones fundamentales en el sistema nervioso [Azab et al., 2017]. Además, una pequeña reducción de la dosis no puede producir el efecto deseado. Por lo tanto, el mecanismo de control todavía se encuentra bajo investigación.

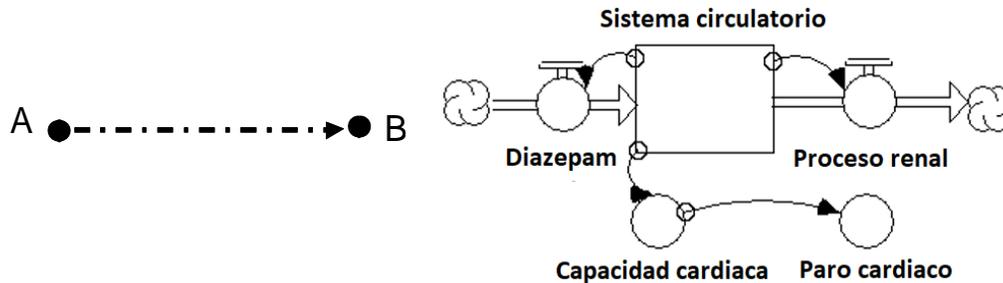


Figura 3.9 Efecto excesivo

$$\frac{d(C)}{dt} = (D - R) \Rightarrow C(t) = D(t_0) + \int_0^t (D - R)dt \quad \dots \quad (3.16)$$

En donde: C = Sistema circulatorio, D = Cantidad de diazepam and R = Procesamiento renal.

3.1.10 Discusión de arquetipos

Los modelos descritos en la sección anterior demuestran que es posible modelar los problemas inventivos de los arquetipos de TRIZ y con ello simular las relaciones entre las partes constituyentes. Los nueve casos mostrados que componen la sección tienen como propósito ilustrar que es factible combinar el enfoque de modelado de la Dinámica de Sistemas con los arquetipos de la teoría de TRIZ. Además, el conjunto de casos expone la factibilidad de modelar situaciones inventivas y luego conectar el conflicto con la caja de herramientas TRIZ para hallar una solución.

La combinación de TRIZ con Dinámica de Sistemas produce beneficios para ambos elementos y genera una herramienta de resolución de problemas más flexible y potente. Probablemente, la ventaja más significativa es una estructura formal para modelar problemas inventivos y simular sus relaciones con el objetivo de observar cómo el sistema cambia en el tiempo (esta habilidad no está presente en TRIZ).

Por su parte, Dinámica de Sistemas mejora si asimila la caja de herramientas TRIZ. En este escenario, el usuario construye un modelo del sistema, luego formula el conflicto y, por último, TRIZ sugiere una estrategia de resolución en donde el usuario simula la solución y la recomienda.

Existen varias oportunidades de investigación: (1) Configuración de una metodología flexible para combinar las herramientas de TRIZ con Dinámica de Sistemas. (2) El modelado de servicios tiene muchos desafíos y TRIZ está explorando recientemente este campo. Los casos presentados en este documento demuestran que la sinergia entre TRIZ y Dinámica de Sistemas puede modelar problemas inventivos basados en las herramientas de simulación dinámica.

Conclusión del capítulo III

A lo largo de este capítulo se mostró la modelación dinámica de los nueve arquetipos de [Salamatov, 1999] que demuestra la factibilidad de representar problemas inventivos y modelarlos a través del enfoque de Dinámica de Sistemas. Estos modelos representan la base para la creación de modelos de mayor complejidad que se mostrarán en los capítulos IV y V. En ellos, se presentarán dos diferentes metodologías encargadas de hacer una sinergia entre TRIZ y Dinámica de Sistemas, la primera enfocada a resolver contradicciones y la segunda a la modelación de funciones a través del SFA.

Por lo anterior, la representación de arquetipos en Dinámica de Sistemas es un excelente punto de partida ya que permite generar un aporte que de acuerdo al estado del arte no había sido explorado anteriormente. Cabe mencionar que los modelos mostrados en la sección 3.1 tuvieron una buena aceptación en la conferencia internacional “Hybrid Artificial Intelligent System (HAIS 2017)” celebrada en la Universidad de la Rioja, Logroño, España (ver Anexo B).

Capítulo IV

Metodología TRIZ + DS

La teoría TRIZ cuenta con tres grandes herramientas dentro de su enfoque: Análisis de contradicciones físicas y técnicas, análisis Campo – Sustancia (SFA) y Análisis de tendencias de evolución (ToE). Este capítulo se centra únicamente en la propuesta metodológica de un enfoque que permita evaluar las contradicciones físicas y técnicas de un sistema a través del tiempo.

Una contradicción surge cuando en un sistema, la tentativa de mejorar un cierto parámetro ocasiona la degradación inaceptable de sí mismo dentro del sistema o bien de otro parámetro también útil y viceversa. [Altshuller, 1973].

En una contradicción física se exige la existencia simultánea de dos estados mutuamente exclusivos, correspondientes a una función o componente del sistema, mientras que en una contradicción técnica ocurre cuando la mejora de un parámetro o característica útil de un sistema, provoca la degradación de otro parámetro o característica también útil y viceversa.

4.1 Creación de la metodología TRIZ + DS

TRIZ y Dinámica de Sistemas (DS) cuentan con metodologías propias para resolver problemas de acuerdo a su área. La actual metodología de Dinámica de Sistemas fue producto de los trabajos de [Forrester 1961] y [Sterman 2000] quienes sintetizaron los pasos para la creación de modelos de simulación dinámica. La actual metodología que sigue la Dinámica de Sistemas está compuesta por cuatro fases: (1) Conceptualización (2) Formulación (3) Evaluación y (4) Implementación. Dichas fases se resumen en la tabla 4.1.

Dinámica de Sistemas			
Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
Conceptualización	Formulación	Evaluación	Implementación
1) Selección del escenario. 2) Definir el propósito del modelo. 3) Identificar las variables críticas y los límites del modelo. 4) Establecer el horizonte de tiempo. 5) Establecer las relaciones entre las variables. 6) Desarrollar el diagrama causal.	1) Elaboración del diagrama de Forrester. 2) Determinación de las ecuaciones matemáticas. 3) Estimar y seleccionar los parámetros del modelo.	1) Simular el modelo y probar las relaciones del diagrama causal. 2) Probar el modelo bajo diferentes supuestos. 3) Documentar la respuesta del modelo con análisis de sensibilidad.	1) Presentar el modelo en una forma accesible al usuario. 2) Observar y analizar el comportamiento del modelo bajo diferentes políticas.

Tabla 4.1 Metodología de Dinámica de Sistemas

Por su parte, la metodología de TRIZ es menos definida y más abstracta ya que cuando se abordan problemas de inventiva cada producto o servicio en el que se quiera aplicar es único en sus características.

De acuerdo a [Salamatov, 1999] para resolver contradicciones técnicas se recomienda usar (1) la matriz de contradicciones de [Altshuller, 2005], (2) el uso de recursos, y (3) el concepto del sistema ideal.

Por su parte, [Savransky, 2000] recomienda el uso de (1) principios de separación de [Altshuller, 1986], (2) identificación de recursos, (3) sistema ideal y (4) efectos [Altshuller, 1973] para resolver las contradicciones físicas.

Existe una diferencia significativa a la hora de resolver contradicciones técnicas y físicas, ya que para la resolución de las técnicas se requiere el uso de la matriz de contradicciones mientras que para las físicas se efectúa la aplicación de los cuatro principios de separación. Cabe resaltar que para que ambas contradicciones sean resueltas, sus resultados deben combinarse con los recursos y el sistema ideal [Salamatov, 1999].

El análisis de contradicciones físicas y técnicas de [Salamatov 1999] y [Savransky 2000] se combinó con la metodología de Dinámica de Sistemas propuesta por [Forrester 1961] y [Sterman, 2000] dando lugar a una metodología que engloba una de las herramientas de TRIZ con Dinámica de Sistemas. En la figura 4.1 se muestra la interacción entre ambas técnicas llamada TRIZ + DS:

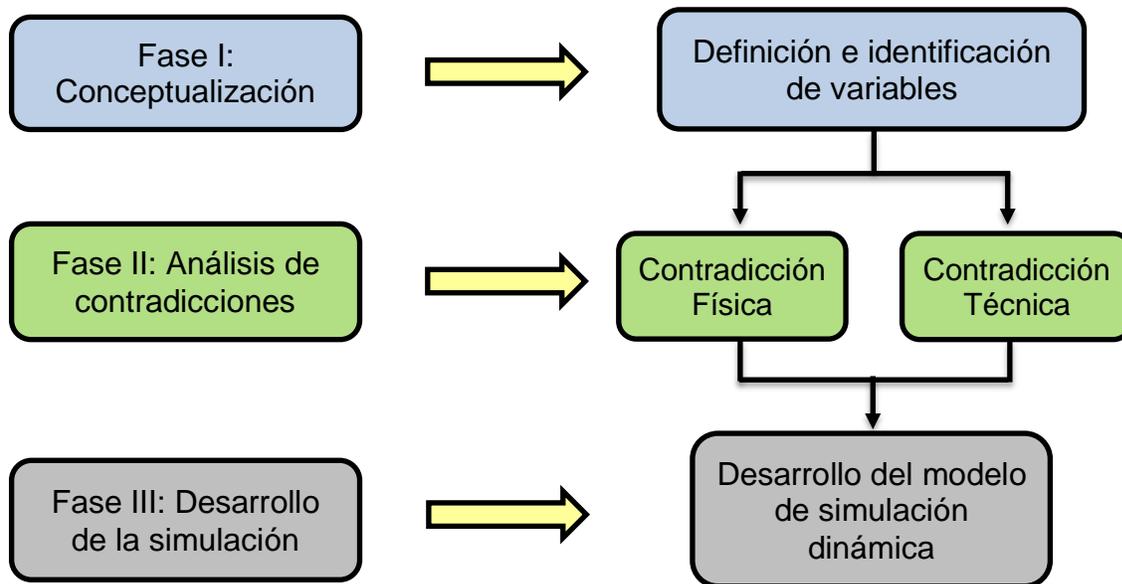


Figura 4.1 Integración de contradicciones a la Dinámica de Sistemas

Tomando en cuenta lo anterior, la propuesta metodológica que engloba TRIZ y la Dinámica de Sistemas enfocada a la resolución de contradicciones técnicas y físicas, dividida en tres fases mostrando la sinergia creada entre ellas a través de un diagrama de flujo.

En la figura 4.2 se muestran las etapas de la metodología propuesta, la cual consta de (1) Conceptualización, (2) Análisis de contradicciones físicas y técnicas y (3) Desarrollo de la simulación, sin embargo, en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 se mostrarán con detalles cada uno de los componentes de la misma.

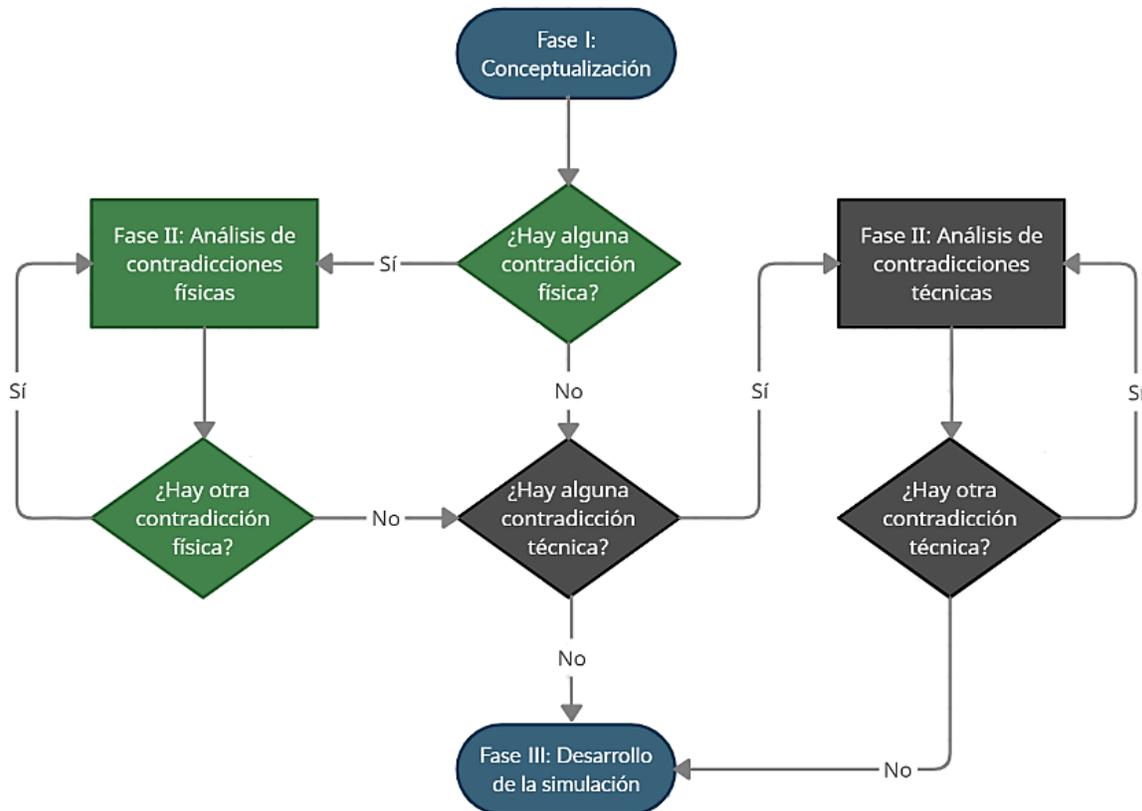


Figura 4.2 Etapas de la metodología TRIZ+DS

4.1.1 Fase 1: Conceptualización

La primera fase comprende un análisis inicial de variables. Esta etapa solo involucra la fase de conceptualización de la tabla 4.1. La metodología de la Dinámica de Sistemas sugiere utilizar un Diagrama Causal de Bucles (CLD). De acuerdo a lo mencionado en la sección 2.1 de esta tesis, el CLD es un gráfico orientado. En estos diagramas, una flecha representa el vínculo causal entre las variables que conecta. Un enlace tiene una polaridad, que denota la influencia: positiva o negativa. En un CLD hay bucles negativos (balanceo) y positivos (realimentación). Los bucles de equilibrio se utilizan para estabilizar el sistema, mientras que los bucles de retroalimentación dan crecimiento al sistema. El modelo de un sistema complejo tendrá varios bucles.

Es importante establecer en esta fase un mecanismo para clasificar y priorizar los bucles de acuerdo con su importancia. Cualquier herramienta de clasificación es factible; sin embargo, el Proceso Jerárquico Analítico (AHP) tiene varias ventajas que lo convierten en una excelente alternativa. Por lo tanto, el AHP permite al usuario decidir el bucle más importante para iniciar el proceso de resolución.

Cada bucle en el CLD contiene al menos una contradicción. Por lo tanto, las variables o parámetros que forman un bucle en el diagrama son las fuentes de al menos una contradicción.

Es posible formular una contradicción física o técnica a partir del análisis de un bucle. Si el usuario percibe una contradicción física, entonces es útil una estructura básica para modelar el problema: la característica, el estado o el parámetro exigen la condición "A" para lograr el efecto "X", pero el estado opuesto "Anti A" para evitar, garantizar o mejorar la condición "Y".

Para modelar una contradicción técnica, [Savransky, 2000] ofrece la siguiente estructura: "El subsistema clave (nombre) debe ser o tiene un (parámetro "positivo"), para (el primer requisito de la herramienta), el subsistema clave (nombre) no debe ser, o no debe tener (parámetro "negativo"), con el fin de (el segundo requisito para la herramienta)".

La etapa de conceptualización transforma la información disponible en cada bucle en al menos una contradicción. La experiencia y la capacidad del usuario deciden la naturaleza del conflicto y la clasifican como una contradicción física o técnica.

Para dar solución a las contradicciones físicas o técnicas, un componente muy importante en la teoría de TRIZ es el Resultado Final Ideal [Altshuller, 1999]. El objetivo del resultado final ideal o un resultado más deseado deriva del concepto de Sistema Ideal. Este sistema no existe físicamente, no consume energía, ni materia, pero proporciona al menos una función útil sin ninguna pérdida, ni efecto perjudicial. Este concepto utópico tiene el poder de concentrar el esfuerzo cognitivo en una dirección común. Crea un propósito compartido por todos los interesados en el proceso de resolución. Para mostrar mayor detalle de esto, la tabla 4.2 muestra el desglose de la etapa de conceptualización de la metodología de la figura 4.2.

Fase 1	Pasos
Conceptualización	1.1 Descripción del problema y sus componentes estableciendo condiciones iniciales.
	1.2 Identificar las variables críticas del modelo y hacer un Diagrama Causal de Bucle (CLD)
	1.3 Aproximación al comportamiento del sistema ideal.
	1.4 Identificar los bucles más importantes que generan contradicciones.
	1.5 Formular contradicciones físicas o técnicas y pasar a la fase dos.

Tabla 4.2 Fase de definición

4.1.2 Fase 2: Análisis de contradicciones

La segunda fase se centra en el análisis de las contradicciones físicas y técnicas con el objetivo de definir posibles vías de resolución. Como se mencionó anteriormente, las fuentes de esta información son los bucles descritos en el diagrama causal (CLD). Por lo tanto, una mayor cantidad de bucles equivale a una mayor cantidad de conflictos inventivos. La síntesis de la información disponible produce una red de problemas que tienen relaciones complejas e incluso ocultas. La jerarquía propuesta en la fase anterior es conveniente para clasificar problemas o bucles con el objetivo de guiar el esfuerzo en una dirección, pero también para definir las hipótesis dinámicas.

La Dinámica de Sistemas permite al usuario observar el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo siempre que haya algún cambio en las variables. Una hipótesis dinámica representa un cambio potencial en el sistema. La tabla 4.3 propone un proceso simple para formular contradicciones físicas o técnicas. Si no es posible ofrecer una solución viable a partir del análisis de contradicción, existe una herramienta alternativa a la matriz de contradicción de [Altshuller, 1997] y a los principios de separación [Altshuller, 1986]: el algoritmo de resolución de problemas inventivos (ARIZ) que ofrece una secuencia única para aplicar las herramientas de TRIZ [Altshuller, 1999]. El uso de ARIZ en este trabajo es solo una recomendación. El estudio y análisis de este algoritmo están fuera del alcance de este trabajo.

La información sobre los componentes del sistema (producida en la fase uno) es útil para aplicar otro concepto de TRIZ: los recursos. Según TRIZ, todos los sistemas que proporcionan al menos una función útil evolucionan continuamente a través del uso de sus recursos intrínsecos. La estrategia de resolución debe hacer uso de los recursos ya disponibles en el sistema o el entorno circundante. Un recurso es una parte en el sistema que no se explota completamente, se subestima, pero se puede acceder a él para producir valor sin un costo excesivo. TRIZ considera que los recursos del sistema son la materia prima para una solución inventiva. [Savransky, 2000] ofrece una completa clasificación de recursos. La tabla 4.3 muestra la fase 2 que involucra el análisis de las contradicciones.

Fase	Pasos	
	Contradicciones físicas	Contradicciones técnicas
Análisis de contradicciones	2.1.1 Identificar variables con efectos positivos y nocivos.	2.2.1 Identificar el parámetro para mejorar y analizar las restricciones para mejorarlo.
	2.1.2 Seleccionar uno de los cuatro principios de separación: tiempo, espacio, partes y condiciones.	2.2.2 Usar la matriz de contradicción de Altshuller y usar los principios inventivos para proponer una solución.
	2.1.3 Usar recursos y efectos (si es necesario) para buscar el sistema ideal.	2.2.3 Identificación de recursos y combinarlos con efectos científicos (si es necesario) para buscar el sistema ideal.
	2.1.4 Si hay otra contradicción, repetir estos pasos, si no las hay, analizar contradicciones técnicas.	2.2.4 Si hay otra contradicción, repetir los pasos anteriores, de lo contrario, pasar a la fase tres.

Tabla 4.3 Análisis de contradicciones

4.1.3 Fase 3: Desarrollo de la simulación

Varios pasos de la tabla 4.1 son semejantes a la fase final de la metodología propuesta TRIZ + DS. La creación y aplicación de un modelo de simulación permite el análisis matemático de las fases anteriores. La integración de la simulación dinámica a TRIZ representa una contribución significativa. Además, el análisis de sensibilidad proporciona al usuario cierta información que facilita la toma de

decisiones debido a la capacidad de probar diferentes políticas. En esta fase, las hipótesis dinámicas representadas en el CLD tienen un papel esencial porque permiten analizar diferentes escenarios y evaluar las mejores alternativas de solución. La tabla 4.4 muestra la fase final.

Fase 3	Pasos
Desarrollo de la simulación	3.1 Realizar el diagrama de Forrester y crear las ecuaciones diferenciales del sistema.
	3.2 Evaluar el efecto de una contradicción en el sistema utilizando el modelo de simulación.
	3.3 Simular el modelo en diferentes escenarios y aplicar análisis de sensibilidad.
	3.4 Hacer una interfaz y observar el comportamiento del modelo con diferentes políticas.
	3.5 Usar el modelo de simulación para evaluar y probar una solución potencial.

Tabla 4.4 Desarrollo del modelo de simulación dinámica

4.2 Implementación de la metodología TRIZ + DS

El caso de estudio elegido para la implementación de la metodología TRIZ + DS comprende el análisis de un objeto común: un paraguas. La metodología permite analizar el sistema para identificar algunos conflictos inventivos y luego probar su comportamiento a través de un modelo de simulación dinámica creado en el software Stella®.

4.2.1 Aplicación de la fase 1

La función de un paraguas (denominado como *el objeto* para este caso de estudio) es desviar la mayor cantidad de gotas de lluvia del punto O (Figura 4.3); y también bloquear la luz solar a partir de la relación del radio r . El objeto puede estar en movimiento o descansar en una posición. La eficiencia del objeto depende del porcentaje del cual su función se cumple cuando está en funcionamiento. Las principales variables y atributos del objeto son su radio, grosor y longitud. Estos

parámetros determinan las dimensiones físicas y el tamaño del objeto. La figura 4.3 los muestra gráficamente.

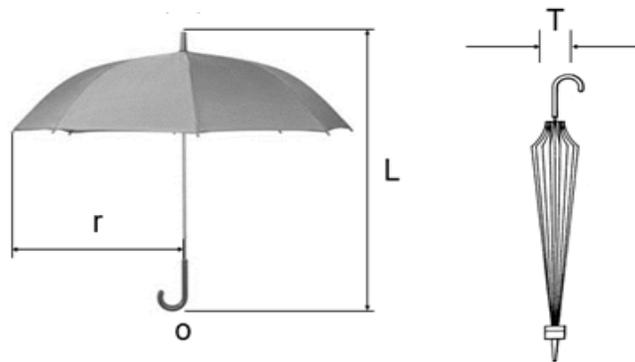


Figura 4.3 Variables principales del objeto

Sin embargo, existe un problema en identificar qué características son las más significativas en el análisis del objeto. Por lo tanto, es necesario identificar la función primaria y secundaria, y luego, clasificar estas funciones. El uso del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) es útil para realizar esta tarea [Ho, 2018], [Khaira, 2018]. La información del objeto se obtiene generalmente con un estudio de mercado o mediante una evaluación comparativa [Terninko, 1997].

Se realizó una evaluación comparativa de diferentes objetos similares disponibles en el mercado para llevar a cabo el AHP. La tabla 4.5 muestra una descripción de las características del objeto y la tabla 4.6 muestra su peso e importancia relativa.

Características	Descripción
Estética	Forma y características físicas del objeto.
Portabilidad	Móvil y fácil de transportar.
Estabilidad	Habilidad para mantener el equilibrio.
Almacenable	Posibilidad de guardar un objeto fácilmente.
Espesor	El grosor del objeto cuando este no está en uso.
Área cubierta	Cantidad de espacio protegido de la lluvia o luz solar.

Tabla 4.5 Descripción de las características

Características primarias	Peso primario	Índice de consistencia
Portabilidad	0.430	0.09
Espesor	0.267	
Estética	0.123	
Almacenable	0.089	
Área cubierta	0.053	
Estabilidad	0.038	
Sumatoria	1	

Tabla 4.6 Análisis AHP

La tabla 4.6 muestra los pesos primarios y un índice de consistencia de 0.09. Este valor se encuentra dentro de los rangos establecidos por [Saaty, 2014].

El objeto es un paraguas portátil, no uno fijo y el usuario es quien propone las condiciones (figura 4.3). Para el estudio de caso, el límite superior o las medidas máximas son:

- La longitud del objeto (L) no debe exceder los 200 cm, que corresponden a la sombrilla portátil más grande del mercado, el cual es un objeto portátil que se usa en exteriores ($L \leq 200$ cm).
- El radio del objeto (r) no debe exceder los 100 cm ($r \leq 100$ cm).
- El grosor del objeto cuando no está en uso (T) no debe exceder los 15 cm ($T \leq 15$ cm).

El problema principal es analizar un paraguas portátil usando TRIZ y Dinámica de Sistemas en dos instantes diferentes. El análisis permite al usuario cambiar el diseño del objeto para mejorar su eficiencia y probarlo a lo largo del tiempo mediante la resolución de contradicciones físicas y técnicas.

Según la figura 4.3, las tres variables críticas en el objeto son espesor (T), longitud (L) y radio (r). Estas variables (medidas en centímetros) son auxiliares e importantes para construir el CLD. Las variables de estado o nivel (que generan ecuaciones diferenciales) se refieren a porcentajes adimensionales, que son: Eficiencia de la función y análisis del área. El valor máximo promedio para una sombrilla portátil es 60 cm en el radio y 70 cm para la longitud. Estas medidas son comunes en los paraguas disponibles para la venta, y están dentro de los rangos establecidos anteriormente ($L \leq 200$ cm, $r \leq 100$ cm y $T \leq 15$ cm).

A su vez, establecer el horizonte temporal es esencial. En los modelos de simulación dinámica, el tiempo que transcurre es la variable principal, ya que se considera una simulación de eventos continuos. El usuario puede elegir el número de años para analizar y observar cómo la eficiencia aumenta o disminuye con el paso del tiempo. El tiempo seleccionado para este modelo es de cinco años. Este período fue elegido debido al análisis de patentes por año del producto.

Las bases de datos de la Oficina Europea de Patentes, y la Oficina de Patentes y Marcas de los Estados Unidos fueron las fuentes del análisis de patentes. Los códigos A45B19, A45B22, A45B23 y A45B25 son útiles para explorar algunas tendencias entre ellas. Las patentes consideradas en este estudio muestran cambios importantes en el diseño en los últimos treinta años. La figura 4.4 muestra el número de patentes anuales desde los años 70. Los cambios más significativos se muestran con un promedio de cinco años.

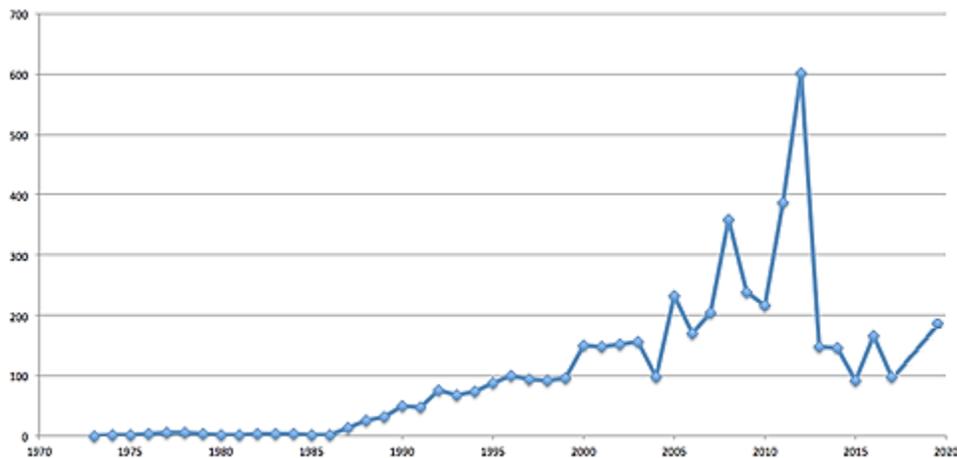


Figura 4.4 Patentes por año desde 1970

De acuerdo a la figura 4.3, las tres variables críticas en el objeto son espesor (T), longitud (L) y radio (r). Estas variables (medidas en centímetros) son auxiliares y cruciales para construir el CLD. Sin embargo, los componentes de un paraguas también son importantes para la construcción del mismo. La Figura 4.5 y 4.6 muestra los componentes del objeto extraído de las patentes estadounidenses US005195550A y US006209556B1. Los nombres fueron traducidos al español, si se desean ver el componente en el idioma original se sugiere buscar las patentes.

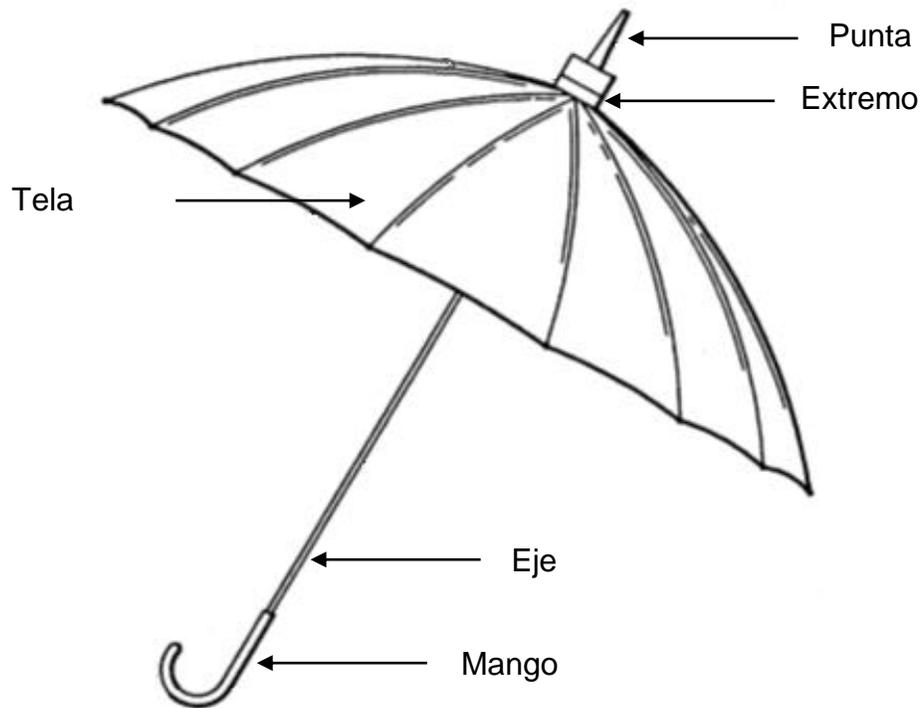


Figura 4.5 Componentes del objeto 1

Fuente: Patente US005195550A

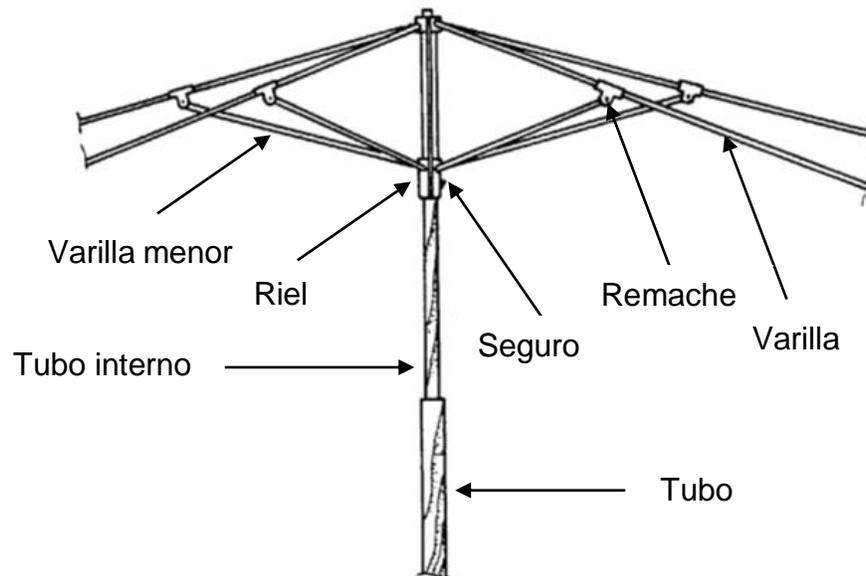


Figura 4.6 Componentes del objeto 2

Fuente: Patente US006209556B1

A partir de los parámetros mostrados en las figuras 4.5 y 4.6 se establece el diagrama causal (CLD) que involucra los principales componentes del objeto.

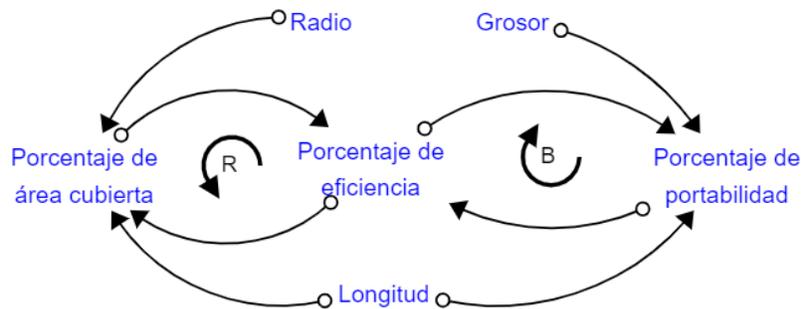


Figura 4.7 Diagrama causal (CLD)

La figura 4.7 muestra dos bucles importantes. Con respecto al primer bucle (R), si el porcentaje de área cubierta por el objeto aumenta, la eficiencia de la función aumenta y viceversa. En el bucle de balanceo (B), aumentar la eficiencia de la función reduce el porcentaje de portabilidad y viceversa. Hay dos variables en el primer bucle: (1) el porcentaje del área cubierta y (2) el porcentaje de la eficiencia de la función. La relación de ambas variables constituye un bucle de retroalimentación, que mueve al sistema a expandir su función útil. El incremento es la consecuencia natural de una variable sobre la segunda.

Un bucle de equilibrio debe tener al menos una polaridad negativa y mueve el sistema a una condición estable y, posteriormente, al equilibrio. Los bucles tienen un papel importante, ya que es en ellos donde residen las contradicciones físicas y técnicas, como se verá más adelante.

Un sistema ideal es un estado utópico. Este estado no genera costos ni ocupa espacio o volumen en el espacio. En él la eficiencia del sistema durante el tiempo de operación no tiene ninguna pérdida y corresponde al 100%. En otras palabras, el objeto analizado debe desviar el 100% de las gotas de lluvia mientras está en funcionamiento, y debe adaptar su forma a los requisitos del usuario siendo portátil tanto en su funcionamiento, como en su estado de reposo.

La selección del bucle más importante para iniciar el proceso de solución se basa en el AHP (tabla 4.6). Según la figura 4.7, ambos bucles generan al menos una contradicción. La tabla 4.6 muestra que la característica con la mayor importancia ponderada corresponde al radio. En consecuencia, el bucle de retroalimentación (R) representa la contradicción con la prioridad más alta en la búsqueda de su solución. El diagrama causal mostrado en la figura 4.7 muestra que hay dos contradicciones: una técnica y otra física. El bucle de retroalimentación y el bucle de balanceo contienen la contradicción técnica, ya que "si el radio aumenta, la eficiencia de la función aumenta, pero la portabilidad disminuye", evaluando el área cubierta contra la portabilidad. Para obtener la contradicción física es necesario evaluar solo el área y compararla contra sí misma en el circuito de retroalimentación. El enfoque resultante es que "el área debe ser grande cuando el objeto está en funcionamiento, pero pequeña cuando no lo está". La siguiente etapa de la metodología contiene el análisis de las contradicciones.

4.2.2 Aplicación de la fase 2

Contradicción Física

El análisis del AHP ayuda al usuario a clasificar los bucles de acuerdo con los requisitos más relevantes y, por lo tanto, a facilitar la toma de decisiones en el proceso de resolución de problemas.

El análisis de las contradicciones físicas es una actividad compleja. Contiene el estudio de un único parámetro, que exige diferentes estados lógicos y diferentes principios físicos para operar. Como resultado, la aparición de una contradicción física en un sistema aumenta la complejidad del proceso de resolución porque exige un proceso de razonamiento que con frecuencia es complejo.

Para la contradicción física, la variable a analizar es el área. El efecto positivo se produce mientras que el objeto produce su función útil. El efecto negativo ocurre cuando el objeto está inactivo.

El área depende directamente del radio. Por lo tanto, la contradicción física es "El área del objeto debe ser grande cuando el objeto está en operación, pero pequeña cuando no lo está" (ver figura 4.8).

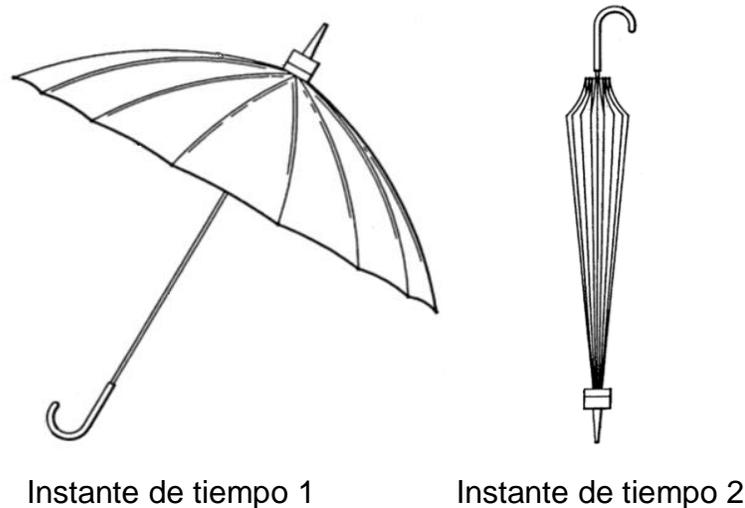


Figura 4.8 Contradicción física

Fuente: Patente US005195550A

De acuerdo a lo mostrado en la figura 4.8 el principio de separación en el tiempo es el más apropiado porque hay dos estados diferentes en dos períodos diferentes. El objeto debe tener características físicas específicas (dimensiones) mientras ejerce su función y otras diferentes cuando no lo hace. Lo anterior produce una separación en dos instancias de tiempo diferente. Sin embargo, esta solución no es suficiente para satisfacer los requisitos del usuario, que solicitan un radio que modifique su longitud para satisfacer diferentes requisitos sin comprometer la función útil.

Una vez definido el principio de separación apropiado, es necesario conocer los recursos con los que se cuentan. De acuerdo con el enfoque TRIZ, un sistema tiende hacia su ideal al garantizar funciones útiles, sin generar funciones inútiles o dañinas sin costo alguno. Por lo tanto, cualquier técnica en constante evolución tiene recursos disponibles que pueden mejorar su operación y acercar el sistema a su estado ideal. Según [Savransky, 2000] hay diversas clases de recursos: ambientales (naturales), tiempo, espacio, sistema, sustancia, energía, información y recursos funcionales. El uso de los recursos disponibles produce soluciones

inventivas para resolver problemas. La tabla 4.7 establece una relación entre cada componente y sus recursos más relevantes, además enumera los recursos más relevantes. El propósito de esta tabla es crear un inventario de recursos potenciales para tener en cuenta durante el proceso de resolución. Esta es una parte importante para la búsqueda del sistema ideal.

Componente	Recursos						
	Natural	Tiempo	Espacio	Sustancia	Energía	Información	Funcional
Punta	-	-	-	Propiedades plásticas	-	-	Diseño aerodinámico
Extremo	-	-	-	-	Presión	-	-
Tela	Agua, flujo de aire	Cambio de forma	Un lado no se usa	Flexible, resistente al agua, color	Resistencia al aire y luz	Capacidad para mostrar información	-
Eje	-	-	-	Rigidez, propiedades metálicas	-	-	-
Mango	-	-	Espacio interno	-	-	-	Sujetar al objeto
Varilla menor	Fuerza	-	Cambio de posición	-	-	-	-
Riel	-	-	-	-	-	-	Capacidad de deslizarse
Seguro	-	-	-	-	Presión	-	Freno de la varilla menor
Varilla	-	-	Cambio de posición	-	Fuerza	-	-
Tubo	-	-	Cavidad interna	-	-	-	-
Remache	-	-	-	Alta resistencia	Presión	-	-
Tubo interno	-	Principio telescópico	-	-	-	-	-

Tabla 4.7 Recursos

El concepto de un sistema ideal juega un papel crucial en el proceso de modelado y resolución. Por definición, un sistema ideal es un sistema que no existe y, sin embargo, el sistema asegura y entrega las funciones útiles. Un sistema ideal es un sistema que no genera costos, no ocupa espacio ni volumen en el espacio, y su eficiencia es del 100% sin pérdidas ni desperdicios.

El concepto de un sistema ideal es útil para proponer el mejor escenario, que tiene el beneficio de enfocar el esfuerzo del usuario en una dirección común. Además, es útil proponer indicadores clave de desempeño. La introducción del concepto de idealidad en el proceso de modelado permite el proceso básico de resolución de problemas de TRIZ, que incluye tres conceptos: (1) modelar un conflicto como una

contradicción y vincularlo con un principio de resolución (principio inventivo o de separación según la naturaleza de la contradicción). (2) Definir la solución ideal para guiar el esfuerzo de resolución, y (3) Utilizar los recursos disponibles en el sistema. Siguiendo esta lógica, la combinación del principio de separación en el tiempo, los recursos enumerados en la tabla 4.7 y el concepto de sistema ideal conducen a la conceptualización de un paraguas ideal que es completamente portátil y cubre completamente al usuario.

Es importante notar que la contradicción física exige la modificación del área, por lo tanto, los recursos espaciales pueden ofrecer una solución. La columna de recursos espaciales contiene recursos que afectan directamente el tamaño y la portabilidad del objeto, como el lado no utilizado de la cubierta y las diferentes posiciones en las varillas y varillas menores. El desafío entonces es encontrar una manera de transformar los recursos disponibles en soluciones potenciales, mientras que la lógica detrás del principio de separación guía el proceso de razonamiento.

Para ayudar al usuario en esta tarea, TRIZ sugiere el uso de efectos científicos. Si el solucionador sabe lo que necesita, pero no puede identificar cómo implementar un proceso o materializar cierto resultado, entonces el uso de efectos científicos es la herramienta a utilizar. Los efectos científicos tienen tres clases: efectos físicos, químicos y geométricos. Según [Savransky, 2000], si la acción requerida (correctamente) es reducir o aumentar el área o la longitud de un cuerpo con el mismo peso, es necesario utilizar cualquiera de los siguientes efectos geométricos:

- Configuración de varios niveles
- Usar figuras con una sección variable.
- Cinta de Moebius
- Utilizar las áreas circundantes.

Las varillas y varias internas pueden cambiar su posición, por lo que el uso de las áreas circundantes es una posible solución para resolver la contradicción física. El área del objeto se verá afectada por el uso de recursos y efectos. El principio de separación en el tiempo y su combinación con recursos y efectos se ajusta al

análisis. Este principio de separación seleccionado permite examinar el objeto en dos instantes de tiempo, el uso de recursos y los efectos que guían al usuario en la búsqueda de soluciones en la contradicción física. La fase 3 incluye la aplicación de la misma. Sin embargo, además del uso de las áreas circundantes, una configuración de varios niveles también proporciona una posible solución. Este efecto puede originar algunos diseños conceptuales adecuados.

Contradicción técnica

El análisis de la contradicción física cubre solo el bucle de retroalimentación. Sin embargo, no considera la portabilidad del objeto porque depende del peso y el volumen. Para analizar ambos bucles a la vez es necesario hacer un análisis de la contradicción técnica.

A diferencia de la contradicción física, la contradicción técnica no analiza los bucles aislados, sino que se analizan varios bucles simultáneamente. Esta contradicción involucra el bucle (R) y (B) simultáneamente. Las alternativas de solución pueden utilizar dos modelos. El primero solo evalúa el primer bucle. La evaluación de un bucle aislado en la contradicción física genera un modelo de simulación centrado en la mejora de un solo parámetro. El segundo modelo toma en consideración ambos bucles y brinda la oportunidad de analizar relaciones más complejas en el modelo.

Hay varias contradicciones técnicas en el objeto. La tabla 4.8 muestra algunos de ellos y los principios inventivos sugeridos por la matriz de contradicción. Según la tabla 4.8, hay cinco contradicciones técnicas importantes. Para este caso de estudio, se tomará en cuenta únicamente el conflicto entre volumen contra área. Ambas variables implican la eficiencia de la función y la portabilidad. Por lo tanto, la contradicción técnica expresa que "si la eficiencia de la función aumenta, la portabilidad disminuye".

Contradicción técnica	Parámetro 1	Parámetro 2	Principios inventivos
1	Eficiencia	Volumen	15, 19, 14, 4, 3
2	Volumen	Área	17, 4, 7, 1, 31, 5
3	Estabilidad	Volumen	24, 5, 39, 35
4	Forma	Área	4, 17, 5, 2, 14
5	Volumen	Peso	31, 35, 40, 2

Tabla 4.8 Contradicciones Técnicas

El parámetro a mejorar es el volumen del paraguas (contradicción técnica 2) ya que ambos involucran las variables de entrada de la simulación. Por lo tanto, para analizar el porcentaje del área, es necesario definir las dimensiones del radio, y para un análisis del porcentaje de portabilidad, se requiere conocer el volumen del objeto. El parámetro a mejorar es el volumen de un objeto en movimiento (parámetro 7 de la matriz de contradicción [Altshuller, 1997]), ya que la portabilidad y el peso del objeto dependen de ello. Al haber un aumento en la masa, también hay un aumento en el volumen. Esto se traduce en un aumento de peso. El peso no es parte de un bucle, es una relación causal simple y, por lo tanto, el peso y la masa se consideran variables auxiliares en el CLD.

Existe una relación entre las restricciones de las dimensiones del objeto. Una sombrilla fija (utilizada para jardín o playa) tiene un tamaño promedio de más de 2 metros de longitud y un radio superior a 1 metro (US2661752A). Debido a que el objeto debe ser portátil, las medidas máximas son 2m de longitud, 1.05m de radio y 0.15m de espesor.

La matriz de contradicciones tiene estos parámetros: el parámetro 7 (volumen de un objeto en movimiento) se compara con el parámetro 5 (área de un objeto en movimiento). La figura 4.9 presenta un fragmento de la matriz de contradicción con los parámetros descritos. Cabe mencionar que la matriz completa cuenta con 39 parámetros en total.

CARACTERÍSTICA A MEJORAR		FÍSICO									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
FÍSICO	1	Peso de un objeto móvil		3 19 35 40	17 15 8 35	15 17 28 12	28 17 29 35	17 28 1 29	28 29 7 40	40 35 2 4 7	3 35 14 17
	2	Peso de un objeto estacionario	35 3 40 2		17 4 30 35	17 35 9 31	17 3 30 7	17 14 3 35	14 13 3 40	31 35 7 3 13	13 7 3 30 35
	3	Longitud / ángulo del objeto móvil	31 4 17 15	1 2 17 15 30		1 17 15 24	15 17 4 14 1	17 3 7 15 3 1	17 14 7 4 3	17 31 3 19	1 35 29 3
	4	Longitud/ángulo de un objeto estacionario	35 30 31 8	35 31 40 2	3 1 4 19 17		3 4 19 17 35	17 40 35 10	35 30 14 7	14 35 17 2 4	13 14 15 7
	5	Área de un objeto en movimiento	31 17 3 4 1	17 15 3 31 2	14 15 4 18 1	14 17 15 4		17 1 4 3 24 5	14 17 7 4 13	14 17 7 13 4	35 4 14 17
	6	Área de un objeto estacionario	14 31 17 19	35 14 31 30	17 19 3 13 1	17 14 3 4 7	4 31 7 19 15		17 18 14 7	14 28 26 13	17 5 4 7 28
	7	Volumen de un objeto en movimiento	31 35 40 2	31 40 35 26	1 7 4 35 3	7 15 4 3 1 35	17 4 7 1 31 5	17 14 4 3 31		35 14 28 2 3	15 1 14 19
	8	Volumen de un objeto estacionario	31 30 40 35	35 40 31 9	14 30 15 3 4	35 2 30 4	15 14 4 30	14 3 7 4 30	14 35 3 13		7 35 2 30 31
	9	Forma	29 30 3 10	15 3 10 31	4 14 29 5	17 14 4 13 5	4 17 5 2 14	17 14 5 28 2	14 4 15 3 7	14 4 7 1 2 35	
	10	Cantidad de sustancia	35 40	35 40	29 3	35 31	15 14	17 31	2 15	35 2	35 7

Figura 4.9 Fragmento de la matriz de contradicciones

Según la matriz, la intersección de la fila con la columna, contiene algunos de los principios inventivos. Para resolver la contradicción de volumen de un objeto en movimiento, contra área de un objeto en movimiento, los principios inventivos son 17, 4, 7, 1, 31 y 5:

17: Otra dimensión: Mover un objeto o sistema en espacios de dos o tres dimensiones. Utilice una matriz multidimensional de objetos.

4: Cambio de simetría (asimetría): El cambio de forma de un objeto y un sistema de su simetría o asimetría.

7: Anidar (a manera de muñeca anidada Matrushka): Colocar cada objeto por turno dentro de otro. Hacer que una parte pase a través de la cavidad de otra.

1: Segmentación: Dividir un objeto o un sistema en partes independientes. Hacer un objeto accesible para desarmar.

31: Materiales porosos: Hacer un objeto poroso o agregar elementos porosos (insertos, recubrimientos, etc.).

5: Fusión: Acercar (o fusionar) objetos idénticos o similares, armar piezas idénticas o similares para realizar operaciones paralelas.

La combinación de los principios de segmentación y anidación con los recursos enumerados en la tabla 4.7 produce algunas vías de resolución para proponer soluciones inventivas. El análisis hecho a la contradicción física es similar al de la contradicción técnica. Hay contradicciones físicas que son difíciles de percibir o formular, pero el efecto que producen se refleja en la contradicción técnica [Savransky, 2000]. Los recursos que se muestran en la tabla 4.7 sugieren que los principios de segmentación y anidación son adecuados para encontrar una solución porque la contradicción técnica también cubre el área del objeto. A su vez, la portabilidad del objeto depende directamente del recurso espacial.

Al analizar la tabla 4.7, existen recursos que mejor se adaptan a la solución propuesta en el modelo. Según [Savransky, 2000] para seleccionar el recurso correcto es necesario evaluar la disponibilidad y el costo durante el proceso de selección, incluso de manera subjetiva. El usuario elige los principios más apropiados y luego trata de combinarlos con los recursos disponibles (Tabla 4.7), por lo que estos principios se interpretan a continuación:

7: Segmentación: Comprende dividir un objeto en partes independientes; un paraguas opera con ese principio en el diseño de las varillas que dan forma al tejido.

1: Anidamiento: Se basa en colocar un objeto dentro de otro, los paraguas aumentan su portabilidad cuando el tubo interior se anida en el tubo principal y, con ello, se reduce su volumen.

4.2.3 Aplicación de la fase 3

La tercera fase consiste en la creación del modelo de simulación. El diagrama de Forrester (FD), también llamado diagrama de stocks y flujos, muestra las relaciones entre las variables que cambian con el tiempo y los estados del sistema. La nomenclatura usada para el diagrama de Forrester se describió en el capítulo 1 (tabla 1.1) de este documento. La figura 4.10 muestra el diagrama de Forrester creado.

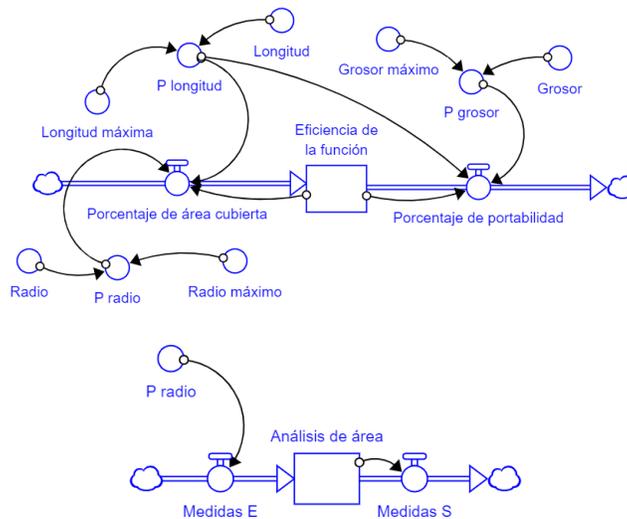


Figura 4.10 Diagrama de Forrester

El Diagrama de Forrester que analiza la contradicción técnica utiliza la regresión lineal múltiple (MLR) como herramienta para llevar a cabo el modelo matemático. El modelo implica algunas variables independientes, como la eficiencia de la función, la longitud y el radio. Además, considera la variable dependiente, que es el porcentaje del área cubierta. La MLR genera la información matemática para el flujo de entrada en relación con la eficiencia de la función. Para el flujo de salida, se realizó otra MLR, pero utilizando como variable dependiente el porcentaje de portabilidad y el grosor en lugar del radio como la variable independiente. Las tablas 4.9 y 4.10 muestran los datos generados a través de la regresión lineal múltiple (ecuaciones 4.1 y 4.2).

P. área cubierta (Y)	Eficiencia de función (x ₁)	Longitud (cm)	P. longitud (x ₂)	Radio (cm)	P. radio (x ₃)
0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.1	0.05	27	0.14	12	0.11
0.2	0.11	43	0.22	23	0.22
0.3	0.25	56	0.28	33	0.31
0.4	0.37	88	0.44	37	0.35
0.5	0.42	92	0.46	48	0.46
0.6	0.70	132	0.66	52	0.50
0.7	0.83	160	0.80	56	0.53
0.8	0.90	178	0.89	69	0.66
0.9	0.95	187	0.94	72	0.69
1	1.00	194	0.97	100	0.95

Tabla 4.9 Regresión lineal múltiple del porcentaje de área

P. Portabilidad (Y)	Eficiencia de función (x ₁)	Longitud (cm)	P. longitud (x ₂)	Grosor (cm)	P. grosor (x ₃)
0	1.00	197	0.99	14.5	0.97
0.1	0.92	184	0.92	13.6	0.91
0.2	0.90	150	0.75	12	0.80
0.3	0.88	130	0.65	9.5	0.63
0.4	0.80	102	0.51	6	0.40
0.5	0.73	54	0.27	4.5	0.30
0.6	0.62	42	0.21	3	0.20
0.7	0.50	20	0.10	2.5	0.17
0.8	0.47	15	0.08	1	0.07
0.9	0.35	10	0.05	0.8	0.05
1	0.00	0	0.00	0	0.00

Tabla 4.10 Regresión lineal múltiple del porcentaje de portabilidad

Los datos mostrados en las tablas 4.9 y 4.10 se obtuvieron experimentalmente al analizar diferentes paraguas y con ello, estableciendo una relación entre las variables. Para obtener los porcentajes de longitud, radio y grosor, fue necesario dividir cada uno de estos datos entre un valor máximo, para tener datos adimensionales que generen porcentajes. Se tomó como longitud máxima = 200cm, radio máximo = 105cm y grosor máximo = 15cm.

Las ecuaciones que representan los flujos son:

Flujo de entrada:

$$P_s = - 0.00868024 + 0.1374997E_f + 0.4270916P_l + 0.49310456P_r \quad \dots \quad (4.1)$$

Flujo de salida:

$$P_p = 1.02717786 - 0.45576278E_f - 0.23704994P_l - 0.32485273P_t \quad \dots \quad (4.2)$$

Donde:

P_s = Porcentaje de área cubierta

E_f = Eficiencia de la función

P_l = Porcentaje de longitud

P_r = Porcentaje de radio

P_p = Porcentaje de portabilidad

P_t = Porcentaje de espesor

El Diagrama de Forrester que analiza la contradicción física involucra otras ecuaciones. Las ecuaciones que representan los flujos son:

Flujo de entrada:

$$I_s = \pi(P_r)^2 \quad \dots \quad (4.3)$$

Flujo de salida:

$$O_s = S_a \quad \dots \quad (4.4)$$

Donde:

P_r = Porcentaje de radio

I_s = Parámetros de entrada

O_s = Parámetros de salida

S_a = Análisis de área

Stella® genera automáticamente las ecuaciones diferenciales que representan el sistema que se está programando, ya sea en su forma diferencial o en su forma antiderivada. Las ecuaciones 4.5 y 4.6 representan las variables de nivel del Diagrama de Forrester.

La ecuación diferencial para la contradicción técnica.

$$\frac{d(E_f)}{dt} = P_s - P_p \quad \Rightarrow \quad E_f(t) = E_f(t_0) + \int_0^t (P_s - P_p) dt \quad \dots \quad (4.5)$$

La ecuación diferencial para la contradicción física.

$$\frac{d(S_a)}{dt} = O_s - I_s \quad \Rightarrow \quad S_a(t) = S_a(t_0) + \int_0^t (O_s - I_s) dt \quad \dots \quad (4.6)$$

Una vez teniendo el Diagrama de Forrester terminado y las ecuaciones correspondientes se recomienda la evaluación del efecto de la contradicción en el sistema usando el modelo de simulación.

Contradicción Física

Esta contradicción requiere dos estados mutuamente excluyentes para generar un resultado. Por lo tanto, es necesario realizar una variación con respecto al radio. La

primera situación implica aumentar el porcentaje de radio (P_r). Como resultado, el efecto produce un gráfico ascendente que permite analizar el aumento de la función a lo largo del tiempo (figura 4.11).

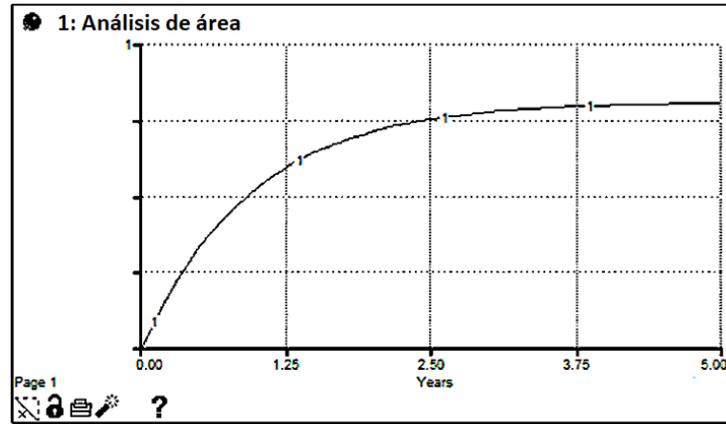


Figura 4.11 Incremento de área

De forma similar, si el porcentaje de radio (P_r) disminuye, aparece un gráfico similar pero descendente (figura 4.12).

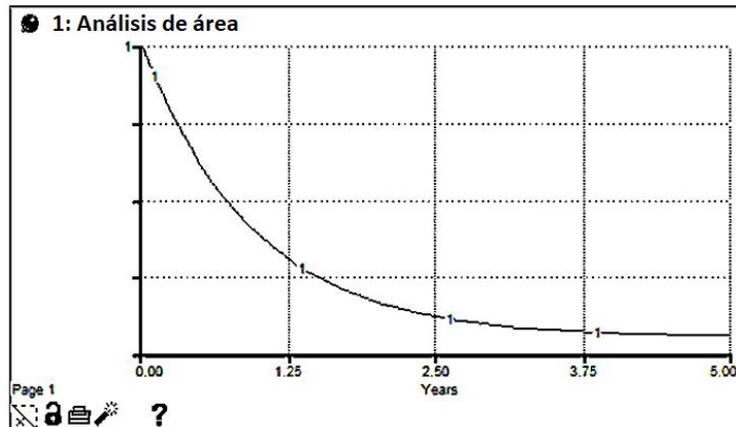


Figura 4.12 Decremento del área

Además, al valor del porcentaje de radio (P_r) también es necesario definir el valor del flujo de salida, que incluye cero. El modelo (ver las ecuaciones 4.3 y 4.4) requiere un valor esencial de (S_a) para generar los gráficos correspondientes.

Contradicción Técnica

La contradicción surge cuando un aumento en las variables de la entrada (P_s) genera una disminución en las variables de la salida (P_p). Estos aumentos o disminuciones generan hipótesis dinámicas:

- 1) El aumento del área del objeto produce menos portabilidad.
- 2) Aumentar el volumen del objeto produce mayor eficiencia.

La Figura 4.13 muestra el aumento en la eficiencia de la función cuando el flujo de entrada (porcentaje de área (P_s)) se prueba con el flujo de salida (porcentaje de portabilidad (P_p)), generando el análisis de dos bucles simultáneamente.

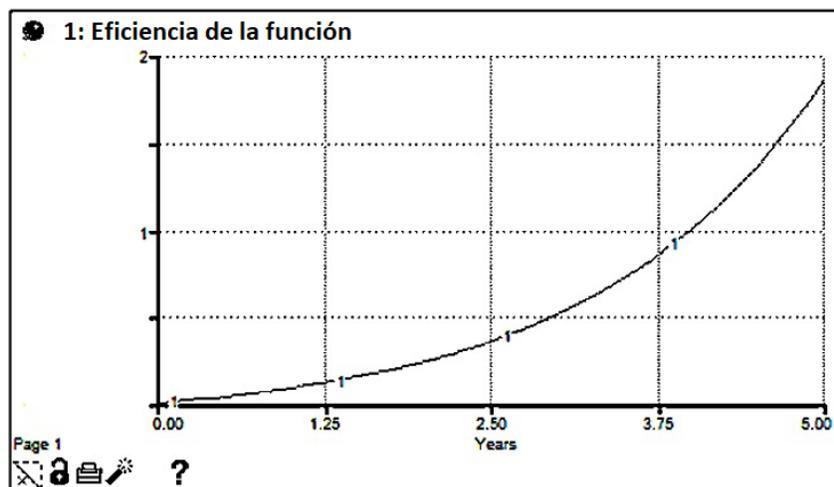


Figura 4.13 Análisis de la eficiencia de la función

El CLD tiene relaciones causales con polaridad positiva o negativa. Las dos relaciones causales, representadas por los bucles, son las que generan las contradicciones mencionadas anteriormente. El usuario puede probar las relaciones causales observando el aumento o disminución lógico de las variables de acuerdo con lo que se expresa en el diagrama causal. Sin embargo, para verificar esta condición en el modelo, es necesario realizar algunas simulaciones para validar las relaciones causales. En este paso, el usuario puede probar las hipótesis dinámicas en el modelo.

Una ventaja de la simulación es que permite evaluar diferentes escenarios cambiando los parámetros de entrada. Después de la verificación de las relaciones causales, el usuario puede realizar algunas simulaciones al probar el modelo en diferentes escenarios.

Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran un ejemplo de diferentes escenarios, al modificar los valores de entrada de las variables que se muestran en la Figura 4.3 (Espesor, radio y longitud).

La Figura 4.14 muestra la simulación del modelo utilizando valores de $L = 95$ cm, $r = 85$ cm y $T = 8$ cm

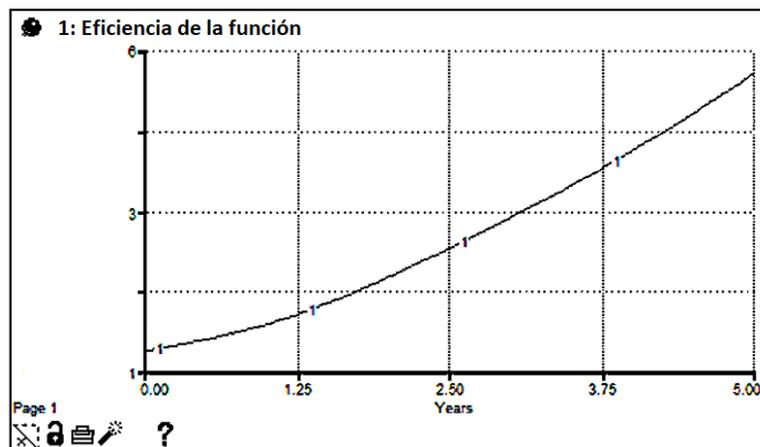


Figura 4.14 Primer escenario

Al cambiar los valores de $L = 70$ cm, $r = 50$ cm y $T = 4$ cm, el gráfico resultante es:

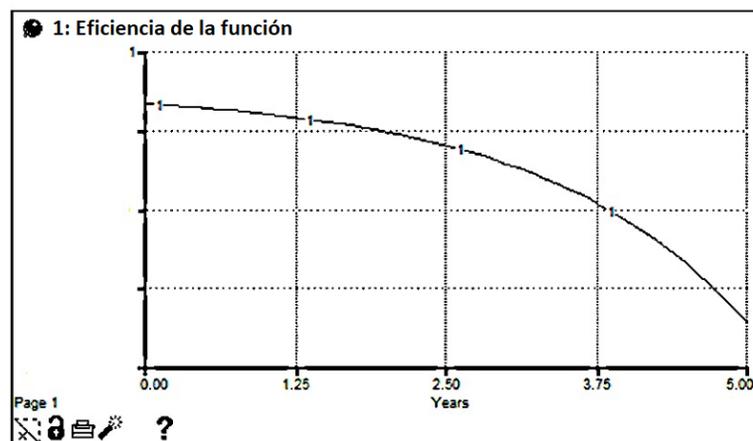


Figura 4.15 Segundo escenario

De acuerdo con las figuras 4.14 y 4.15, cuando el usuario modifica las variables de entrada, el modelo de simulación produce un gráfico que refleja algunos efectos.

Esta información permite al usuario disponer de nuevos recursos para evaluar un resultado potencial. Este proceso tendrá un análisis más detallado en la siguiente sección.

Con la información de diferentes escenarios, el usuario tendrá una perspectiva más amplia sobre el impacto que cada variable tiene en el sistema. Por lo tanto, el usuario puede documentar los resultados y clasificarlos según la sensibilidad del modelo.

Stella® permite la creación de una interfaz para analizar el modelo programado y entregar al usuario final un modelo fácil de operar. La figura 4.16 muestra la interfaz creada para el modelo de simulación.

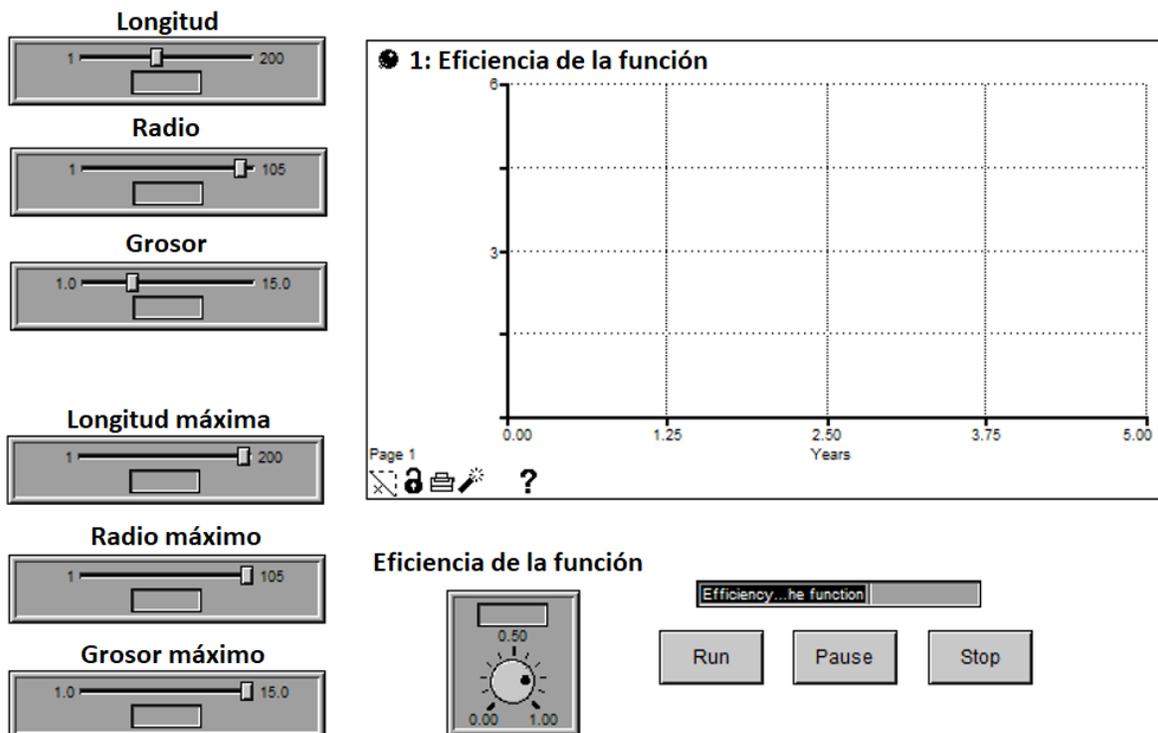


Figura 4.16 Interfaz del modelo de simulación

Desde la interfaz, el usuario final puede manipular las variables de entrada para observar el comportamiento del modelo programado de acuerdo con los datos

capturados. Finalmente, el usuario puede aplicar la matriz de contradicción, o los principios de separación para proponer soluciones potenciales y luego realizar simulaciones. La interfaz permite el análisis del objeto para ver las mejoras de diseño propuestas. Después de una cierta cantidad de simulaciones, el usuario puede identificar futuras contradicciones físicas o técnicas.

La implementación de la simulación permite al usuario analizar el comportamiento de las variables a través de una interfaz gráfica para observar el efecto de una solución potencial. La siguiente sección ofrece un ejemplo de este proceso a través del análisis de la contradicción física y técnica, y la generación de soluciones potenciales para un problema inventivo y la simulación de algunos escenarios.

4.2.4 Implementación del modelo

La metodología propuesta guía la formulación, el análisis y el proceso de resolución de contradicciones físicas y técnicas a través de la aplicación de Dinámica de Sistemas. El caso de estudio muestra que TRIZ y Dinámica de Sistemas forman una herramienta útil donde una complementa a la otra. La necesidad de crear nuevos conocimientos para lograr la resolución efectiva de un problema inventivo [Altshuller, 1984] es el principal argumento para justificar y proponer una metodología combinada, pero también debido al hecho de que Dinámica de Sistemas no cuenta con una herramienta capaz de resolver conflictos. Por ello, la Dinámica de Sistemas requiere el apoyo de otra técnica que cuente con esta capacidad, y TRIZ es una alternativa que ha demostrado su efectividad en diferentes dominios tecnológicos.

Quizás, la principal limitación de TRIZ es que trata solo un problema a la vez por lo que es incapaz de resolver o evaluar conflictos simultáneos. Esto implica que un conflicto se considera como una situación independiente y, en consecuencia, no es posible evaluar cuál es el impacto que una solución tendrá en el sistema. Además que no cuenta con una herramienta capaz de modelar matemáticamente los conflictos inventivos que enfrenta. A su vez, las herramientas de TRIZ no ayudan al usuario en la etapa analítica del problema como la selección del conflicto correcto, ni en el principio de solución correcta o en el recurso más útil. Esta limitación implica

un bajo apoyo matemático en el uso de TRIZ [Savransky, 2000]. Como resultado, los inconvenientes de TRIZ dificultan la capacidad de resolver problemas en sistemas dinámicos; por lo tanto, la combinación entre Dinámica de Sistemas y TRIZ es una oportunidad de investigación.

La sinergia entre TRIZ y Dinámica de Sistemas permite la construcción de una interfaz en el modelo de simulación. Esto permite analizar las contradicciones físicas y técnicas del objeto. La manipulación de las variables de entrada (Espesor, radio y longitud) a través de la interfaz genera diferentes gráficos del comportamiento del objeto. La figura 4.17 muestra la representación gráfica de una contradicción técnica. A medida que aumenta una variable, la otra disminuye. Este análisis le permite al usuario hacer un análisis visual del comportamiento de las contradicciones.

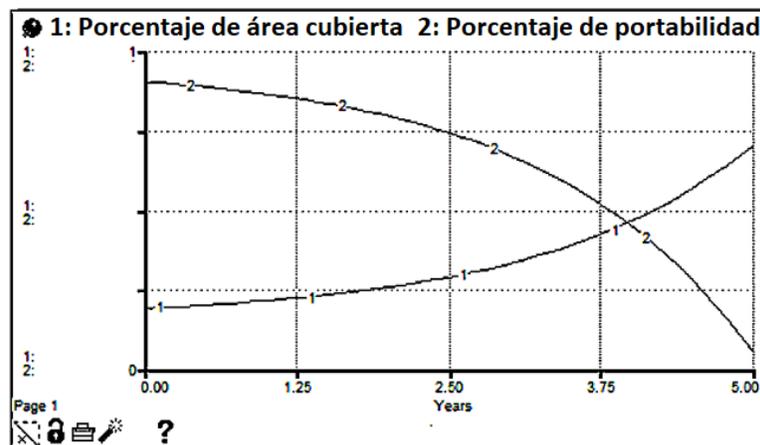


Figura 4.17 Gráfica representativa de contradicción técnica

Al examinar el comportamiento de los gráficos generados en Dinámica de Sistemas, [Sterman, 2000] afirma que hay algunos arquetipos definidos para estudiar el sistema. Los arquetipos principales (figura 4.18) reflejan el crecimiento o disminución de las variables generados a partir de los bucles de retroalimentación (R), o de equilibrio (B).

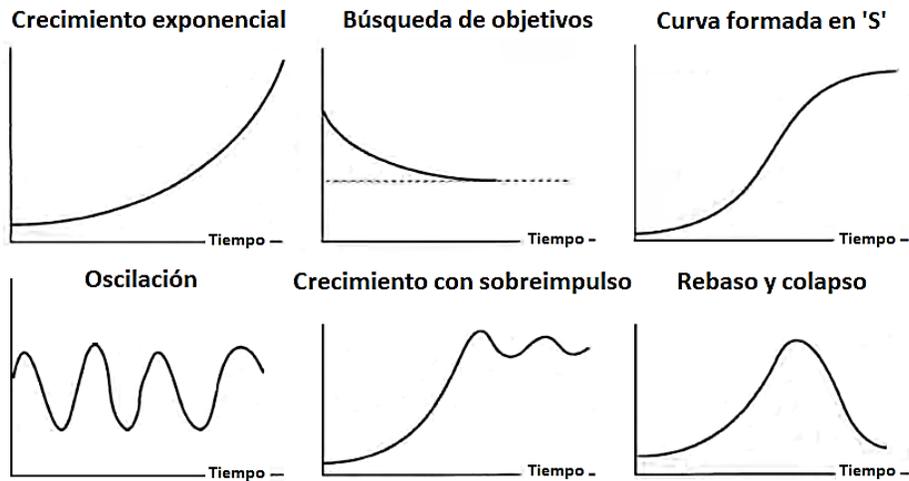


Figura 4.18 Arquetipos de Dinámica de Sistemas

Los arquetipos que se adaptan al comportamiento del caso presentado son el crecimiento exponencial y la búsqueda de objetivos, aunque los otros arquetipos se pueden presentar según el valor de las condiciones iniciales. El arquetipo es útil para interpretar contradicciones. La Figura 4.18 muestra un ejemplo del comportamiento de las variables, a través del crecimiento exponencial y los arquetipos de búsqueda de objetivos. El caso de estudio muestra un modelo que proporciona dos funciones útiles: la capacidad de estandarizar las unidades dimensionales y el uso del AHP para clasificar los bucles. Los metros lineales y cuadrados representan la unidad de área, radio, grosor y longitud. Sin embargo, la representación dimensional de la portabilidad o la eficiencia no tiene unidades físicas, y es adimensional. La falta de homogeneidad entre las dimensiones produce un problema en la programación de Stella. La conversión de las variables de la figura 4.3 a unidades adimensionales a través de un cociente matemático permitió resolver el problema dimensional (tabla 4.9 y tabla 4.10) [Matuszak, 2015]. Con este proceso, todas las unidades terminaron siendo adimensionales. Además, el uso del AHP dentro de la metodología permite al usuario la posibilidad de decidir qué bucle tiene la mayor prioridad en su solución, ya que actualmente, la Dinámica de Sistemas no cuenta con una herramienta que permita jerarquizar problemas.

El caso de estudio comprende la aplicación de la metodología creada para resolver contradicciones físicas y técnicas basadas en los valores de entrada que ingresa el usuario. Una vez que se construye el modelo, el usuario puede ingresar los parámetros deseados para analizar el comportamiento del sistema:

Un paraguas tiene los como parámetros de entrada: $L = 90\text{cm}$, $r = 75\text{cm}$ y $T = 6\text{cm}$, se considera que la eficiencia actual del objeto es del 80%.

Los valores de diseño máximos permitidos en el modelo de simulación son los descritos anteriormente ($L = 2\text{m}$, $r = 1.05\text{m}$ y $T = 0.15\text{m}$). La interfaz permite analizar las contradicciones físicas y técnicas para explorar el efecto de una solución potencial en el sistema.

Análisis de la contradicción técnica

El usuario ingresa los valores anteriores en la interfaz (figura 4.16) con un período de simulación de cinco años. La figura 4.19 muestra el gráfico resultante.

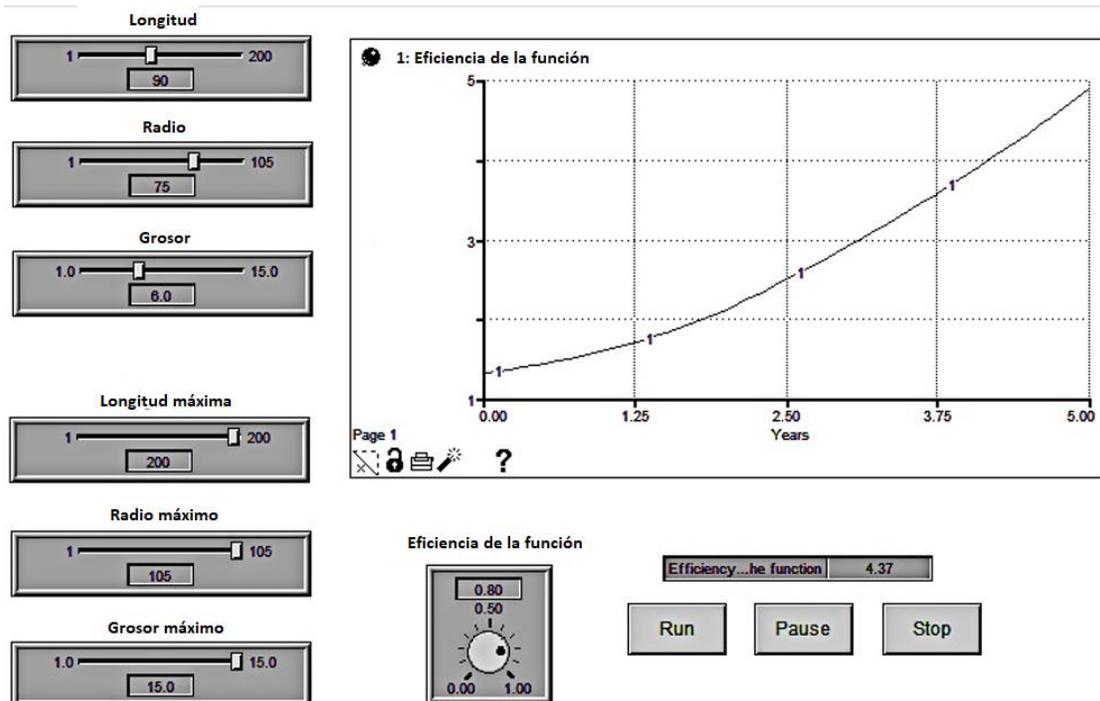


Figura 4.19 Primera simulación de la contradicción técnica

El arquetipo (figura 4.18) que se adapta al comportamiento de la figura 4.19 es un crecimiento exponencial que aumenta año tras año. Stella® permite colocar en la interfaz una pantalla numérica (ver figura 4.20) que permite al usuario conocer el valor final de alguna variable de interés al final de la simulación.

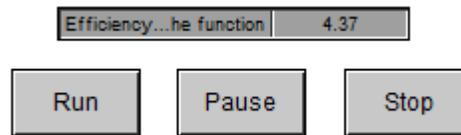


Figura 4.20 Pantalla numérica

La escala de medición de eficiencia es adimensional porque corresponde a un porcentaje. El valor que se muestra en la figura 4.20 indica la eficiencia de la función. El valor de 4.37 surge de la suma de las eficiencias teniendo en cuenta el tiempo transcurrido. Debido a que el período de simulación es de cinco años, el usuario puede obtener un valor anual promedio. Lo anterior implica un aumento en la eficiencia con respecto a los datos ingresados inicialmente (el valor original ingresado es igual a 0.80). Al realizar la operación de $4.37 / 5$, se obtiene una eficiencia promedio de 0.874, que incluye los bucles de realimentación (R) y el de balanceo (B) que produce la contradicción técnica.

De acuerdo con la metodología, para resolver las contradicciones técnicas, es necesario utilizar la matriz de contradicciones. La intersección de celdas (volumen de un objeto en movimiento y el área de un objeto en movimiento) recomienda utilizar los principios de 17: otra dimensión, 4: cambio de simetría, 7: anidación, 1: segmentación, 31: materiales porosos y 5: fusión, los cuales son aplicables para resolver la contradicción del caso de estudio (volumen vs área). La interpretación de los principios inventivos muestra que los principios 1 y 7 (segmentación y anidación) son capaces de resolver la contradicción técnica, debido a su relación con las dimensiones del objeto.

Actualmente, la segmentación de las varillas (a través de las varillas menores y remaches) ha resuelto el problema de aumentar el área cubierta por el objeto y cuidar la portabilidad. En consecuencia, esto disminuye el volumen del objeto cuando no está en funcionamiento.

Al aplicar la segmentación de las varillas, las dimensiones originales del objeto sufren modificaciones. Al realizar una nueva simulación teniendo en cuenta la segmentación, las nuevas dimensiones son: $L = 100\text{cm}$, $r = 85\text{cm}$ y $T = 4\text{cm}$. Las medidas anteriores son propuestas por el usuario. Sin embargo, hay algunos ejemplos de paraguas con características similares (ver las patentes US7913709B2 y US7775226B2). La Figura 4.21 muestra el nuevo gráfico y el nuevo valor en la pantalla numérica.

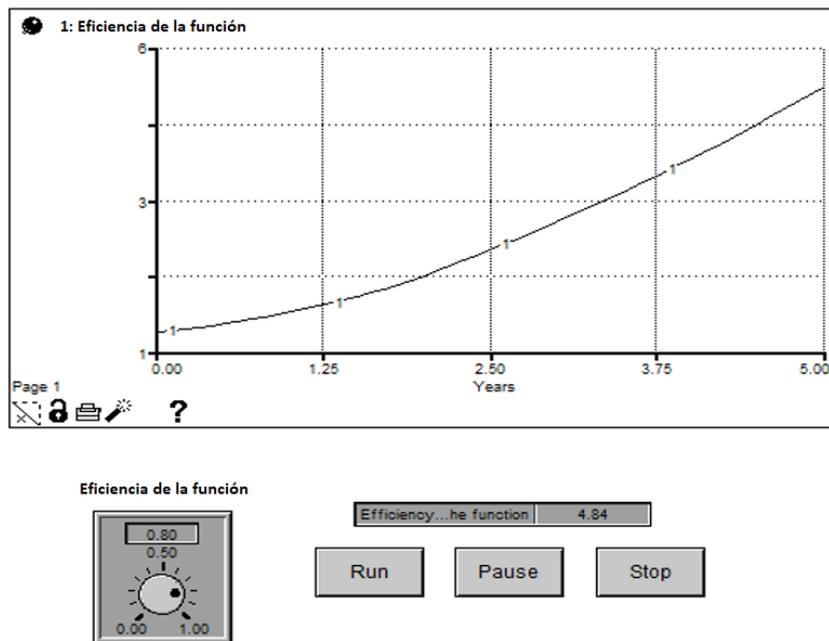


Figura 4.21 Segunda simulación de la contradicción técnica

Con las nuevas variables de entrada, la suma de la eficiencia aumentó a 4.84 (figura 4.21), de modo que, al dividir entre los cinco años de la simulación, se obtiene que $4.84 / 5$ da como resultado una eficiencia de función promedio de 0.968. Este factor muestra que las nuevas dimensiones obtenidas de los principios TRIZ y los recursos disponibles en el sistema aumentan la eficiencia del objeto al cumplir su función.

Análisis de la contradicción física

La simulación también permite un análisis de la contradicción física, permitiendo al usuario comparar el parámetro de interés contra sí mismo. Para el caso de estudio, el parámetro que origina la contradicción física de área contra área es el radio. Este parámetro desencadena el conflicto.

En este análisis, solo es necesario ingresar el radio del objeto en la interfaz y el valor inicial de la eficiencia de la superficie del paraguas (S_a) descrita en la ecuación diferencial 4.6. Suponiendo que las condiciones iniciales son $r = 100\text{cm}$ y la eficiencia actual con valor de $S_a = 0.5$ (50%) se produce el gráfico y la suma de las eficiencias con un horizonte de tiempo de 5 años (Figura 4.22).

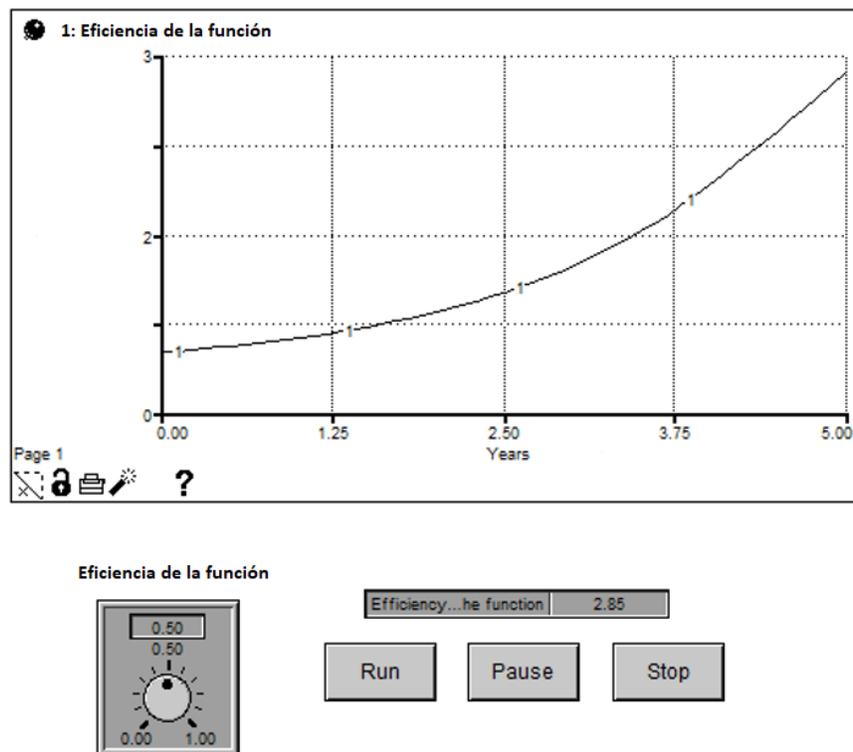


Figura 4.22 Primera simulación de la contradicción física

El valor proporcionado por la simulación es 2.85 (figura 4.22), utilizando el mismo procedimiento de la contradicción técnica, el resultado es $2.84 / 5 = 0.57$. Además, se puede notar que la curva originada crece con el tiempo, lo que demuestra que un radio más alto contribuye a un aumento en la función. Sin embargo, cualquier

aumento en el radio tiene otros efectos en el sistema, y es en este impacto colateral donde reside la contradicción.

Se mencionó que los principios de separación guían el proceso para resolver contradicciones físicas. En el caso de estudio, el principio de separación en el tiempo se ajusta al análisis de la contradicción, ya que el objeto debe tener ciertas dimensiones mientras cumple su función y otras distintas cuando no está en funcionamiento.

Si el usuario disminuye el radio, la gráfica tendrá un cambio significativo a la baja y el valor de la eficiencia final disminuirá. Si el gráfico disminuye a su valor más bajo, no implica que el objeto sea inutilizable, solo refleja que su función no se está llevando a cabo porque no está en funcionamiento. Y, por lo tanto, el valor de la eficiencia tiende a cero.

Suponiendo que $r = 10\text{cm}$ y el valor de eficiencia actual es de $S_a = 0.5$ (50%), entonces se obtiene el gráfico mostrado en la figura 4.23 con la suma de eficiencias.

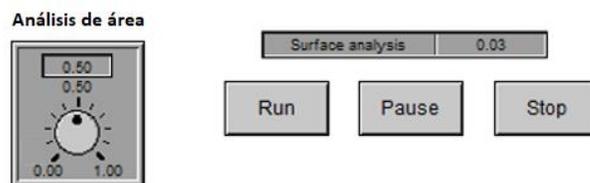
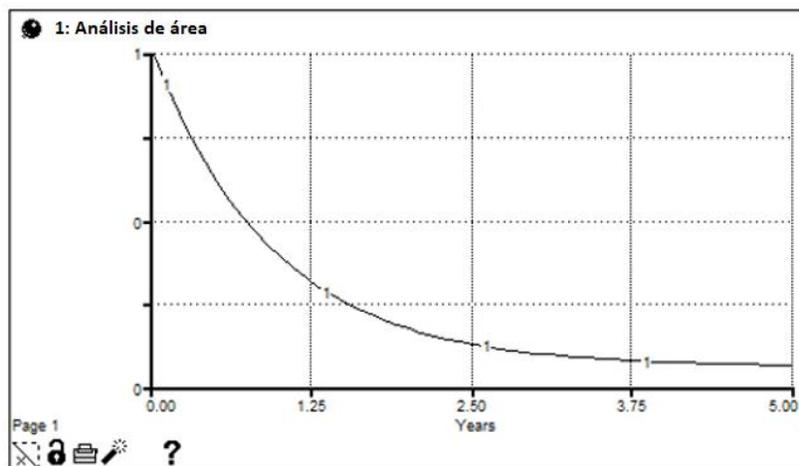


Figura 4.23 Segunda simulación de la contradicción física

Una vez analizadas las contradicciones físicas y técnicas, el usuario tiene el enfoque de Dinámica de Sistemas para comparar a lo largo del tiempo el diseño original del

objeto. Esta visión le permite al usuario la toma de decisiones en el diseño del objeto y hacer modificaciones para identificar futuras contradicciones.

Teniendo en cuenta los principios de separación en el tiempo, los principios inventivos sugeridos por la matriz de contradicción (anidación y segmentación), el uso de recursos y la aplicación de efectos científicos, se propone el siguiente diseño del objeto:

Un paraguas tiene las dimensiones de $L = 90\text{cm}$, $r = 85\text{cm}$ y $T = 5\text{cm}$ (algunos diseños similares están disponibles en las patentes US7484516B1 y US6311707B1). Estas medidas son eficientes ya que el valor obtenido en la pantalla numérica es 4.69 (surge de la suma de eficiencias en un período), lo que da una eficiencia promedio de $4.69 / 5 = 0.938$ en un período de cinco años.

Sin embargo, el resultado no es adecuado cuando el objeto será utilizado por dos individuos en lugar de uno solo. Para resolver el problema, es necesario cambiar las variables de diseño original utilizando el anidado (para resolver la contradicción técnica).

El principio inventivo de la anidación se basa en el concepto de las muñecas rusas Matrushka. Lo anterior comprende colocar un objeto dentro de otro haciendo la analogía de un telescopio. Algunos productos como las antenas de radio portátiles han aplicado este principio. De acuerdo con la figura 4.8, un paraguas típico utiliza el principio de separación en el tiempo porque en un momento dado su radio es pequeño y en otro es grande. Según lo descrito anteriormente, uno de los recursos disponibles es el uso de las áreas circundantes.

Esta es la sugerencia que puede usarse para tratar de alcanzar el sistema ideal. Los extremos de las varillas se pueden anidar dentro del tubo y tubo interno (figura 4.6). Este concepto corresponde también con el principio de separación en el tiempo: el objeto de un momento a otro se puede implementar para aumentar su radio y cumplir la nueva función de cubrir a dos personas simultáneamente (ver figura 4.24)

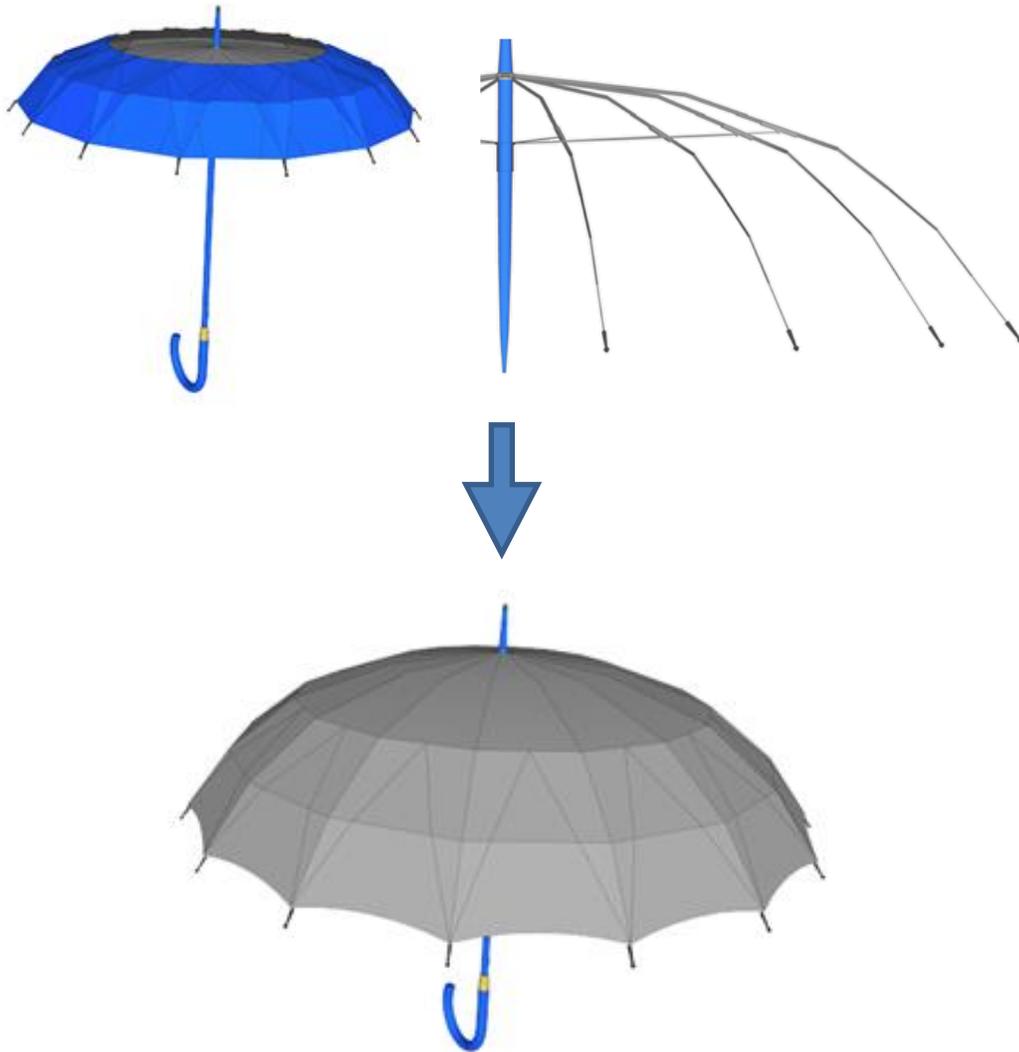


Figura 4.24 Primera propuesta de diseño conceptual

En el instante en que se despliegan los extremos del paraguas, el radio tendrá un aumento significativo. Las dimensiones de longitud y grosor no cambiarán. Una propuesta para nuevas medidas es $L = 90\text{cm}$, $r = 100\text{cm}$ y $T = 5\text{ cm}$ (algunos diseños similares están disponibles en las patentes US6053188A y US5305771A). La nueva simulación da como resultado una visualización numérica de 5.34 (figura 4.25), que cuando se realiza en el período de 5 años da un cociente de 1.06, que es mayor que el anterior. Este valor muestra la eficiencia del uso del principio de separación

en el tiempo, o el principio inventivo de la anidación de Altshuller combinada con el enfoque Dinámica de Sistemas.

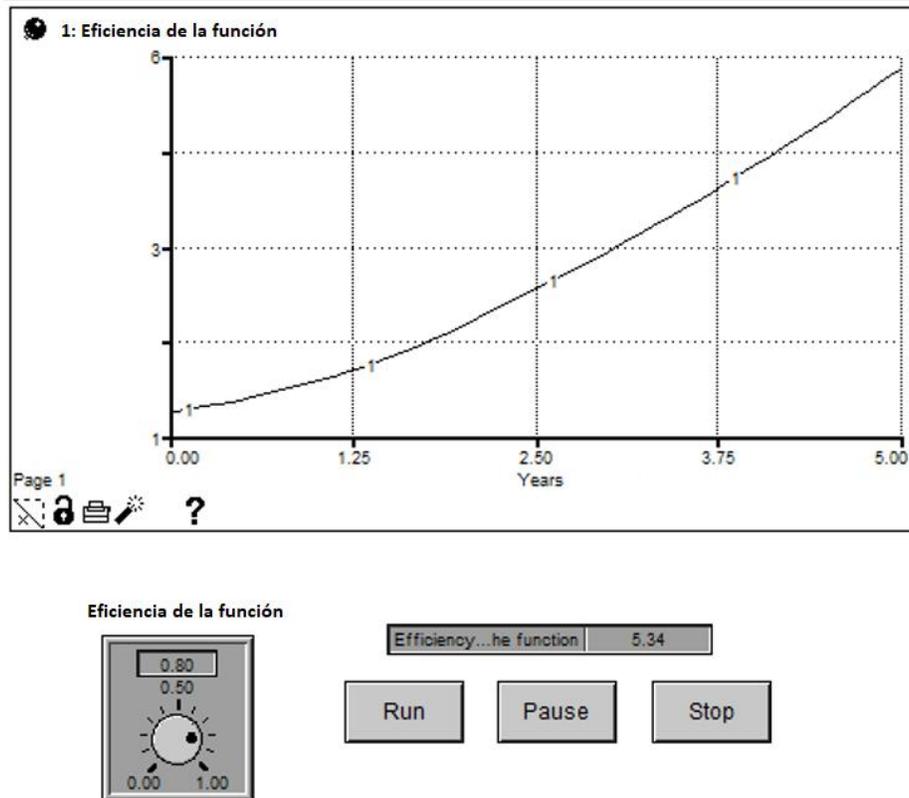


Figura 4.25 Solución de la primera propuesta

El diseño conceptual propone utilizar de forma independiente las áreas circundantes. La solución aumenta la asimetría del objeto, pero le brinda al usuario la capacidad de ampliar las dimensiones del paraguas cuando sea necesario (Figura 4.26).

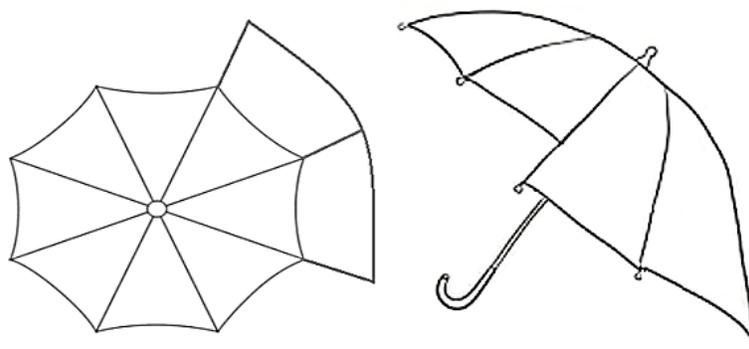


Figura 4.26 Segunda propuesta de diseño

Utilizando las medidas $L = 88\text{cm}$, $r = 105\text{cm}$ y $T = 5.2\text{cm}$, el nuevo resultado en la pantalla numérica es 5.52, lo que da un cociente de 1.104 en el período establecido de 5 años (Figura 4.27).

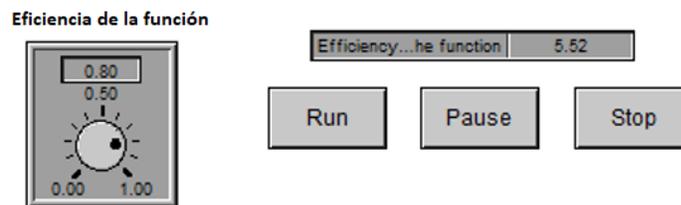
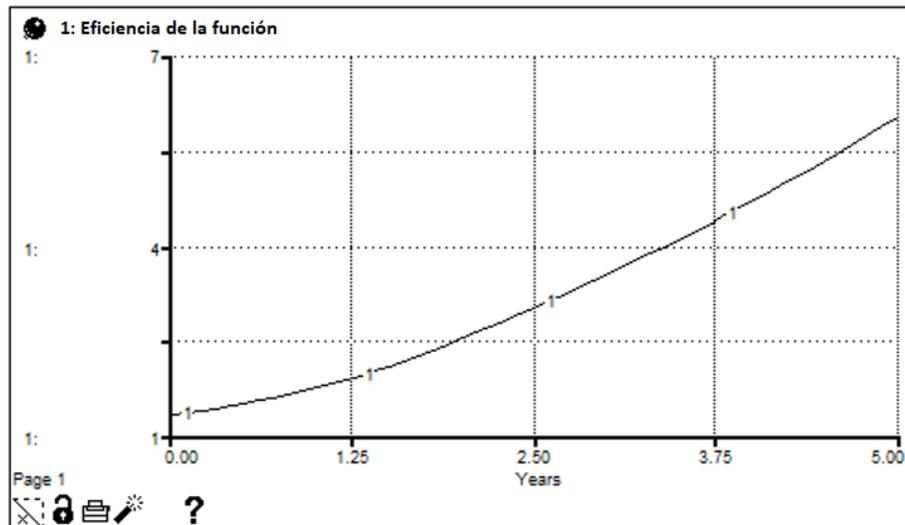


Figura 4.27 Solución de la segunda propuesta de diseño

La tabla 4.11 muestra una comparación entre ambos diseños conceptuales. Esto incluye los diferentes valores y el cociente final.

Diseño conceptual	Espesor	Radio	Longitud	Eficiencia	Cociente
1	90	100	5	5.34	1.06
2	88	105	5.2	5.52	1.10

Tabla 4.11 Comparación entre diseños conceptuales

La eficiencia antes de las propuestas de diseño era de 0.968. De acuerdo con la tabla 4.11, el primer diseño conceptual originó un cociente de 1.06 y el segundo

1.10. Ambos diseños conceptuales tienen más eficiencia en comparación con la propuesta de diseño original. Una estrategia simple para comparar el estado inicial con la propuesta es usar un porcentaje matemático. La tabla 4.12 muestra la comparación entre diseños conceptuales.

Diseño conceptual	Eficiencia	Cociente	Cociente original	Operaciones	Porcentaje de mejora
1	5.34	1.06	0.968	$(1.06-0.968)/1.06= 0.08$	8%
2	5.52	1.10	0.968	$(1.10-0.968)/1.10= 0.12$	12%

Tabla 4.12 Porcentajes de mejora

A partir del resumen, como se presenta en la Tabla 4.12, el usuario puede tomar decisiones sobre diferentes propuestas de diseño.

Conclusión del capítulo IV

TRIZ y Dinámica de Sistemas son técnicas que operan como enfoques independientes. Sin embargo, la fusión de ambas herramientas produce un resultado con grandes ventajas al implementarlo. Este capítulo describió una estrategia para superar algunos de los límites actuales de TRIZ. El enfoque de Dinámica de Sistemas proporciona a TRIZ la capacidad de analizar sistemas a lo largo del tiempo a través de la simulación continua. A cambio, el enfoque Dinámica de Sistemas adquiere la capacidad de proponer soluciones inventivas.

El objetivo principal de este capítulo fue demostrar que es posible combinar dos técnicas para resolver problemas inventivos y obtener a cambio nuevas capacidades para la resolución de problemas. Este objetivo se logró a través de la interacción entre TRIZ y Dinámica de Sistemas en una metodología que sugiere el uso de algunas herramientas y conceptos de TRIZ (el análisis de contradicciones, el uso de recursos, el concepto de idealidad y los efectos) con las capacidades de modelado de Dinámica de Sistemas (análisis causal, modelación matemática, y simulación).

Estas herramientas ayudan al usuario a proponer algunos diseños conceptuales. La metodología creada (TRIZ + DS) representa una contribución que se ilustra a través del estudio de caso analizado. Como resultado, el caso muestra que ambas técnicas refuerzan mutuamente sus capacidades. En consecuencia, la sinergia entre TRIZ y Dinámica de Sistemas produce una metodología que permite al usuario modelar y resolver conflictos con el enfoque de ambas herramientas. La investigación describe un análisis realizado con Dinámica de Sistemas que permite resolver contradicciones técnicas y físicas en donde el caso muestra la compatibilidad de técnicas de la sinergia entre TRIZ y Dinámica de Sistemas. La combinación de ambas técnicas ofrece al usuario la posibilidad de explorar las relaciones intrínsecas dentro de un sistema para decidir qué conflicto es más importante que otro.

Además, la sinergia permite la búsqueda de la solución de problemas inventivos con mayor complejidad. Este caso de estudio ofrece el análisis de los bucles de realimentación (R) y los bucles de balanceo (B) que forman parte del sistema. El

bucle de retroalimentación (área) es lo que causa que el sistema crezca indefinidamente, mientras que el bucle de balanceo limita el crecimiento que puede proporcionar una disminución en lugar de un aumento.

Una vez que se genera el modelo, el usuario puede proponer diferentes escenarios y evaluar el impacto que una variable o parámetro de diseño tiene en el sistema. El usuario explora varias posibilidades en el proceso de diseño a través de una interfaz. Con la implementación del software Stella ®, el usuario tiene la capacidad de analizar gráficamente el comportamiento del sistema y llevar a cabo un proceso de toma de decisiones factible. Existen áreas de oportunidad para implementar en la metodología creada: La aplicación de TRIZ + DS es útil para resolver problemas inventivos en productos manufacturados y servicios. Sin embargo, la implementación de TRIZ + DS en el área de procesos supone una oportunidad de mejora debido a una gran cantidad de contradicciones físicas y técnicas inmersas en un proceso.

Este capítulo solo cubre el análisis de contradicción de TRIZ y su integración con Dinámica de Sistemas. Sin embargo, ambos enfoques pueden obtener mayores beneficios si integran otras técnicas. El próximo capítulo incorpora dentro de la metodología de Dinámica de Sistemas el análisis de una de las otras dos herramientas de TRIZ: Análisis de campo de sustancia (SFA). La integración del SFA permitirá al usuario analizar el objeto desde la perspectiva funcional, ya que esto genera la capacidad de modelar funciones.

Capítulo V

Metodología SFA + DS

El capítulo anterior mostró la propuesta de una herramienta que involucra una sinergia entre contradicciones físicas y técnicas con la simulación dinámica. Este capítulo muestra una propuesta que crea una sinergia entre la segunda herramienta de TRIZ (SFA) con la Dinámica de Sistemas a través de la creación de una metodología. Análogamente al capítulo anterior, se muestra un caso de estudio; en él se crean diseños conceptuales de un producto con el fin de hacer mejoras en el diseño original y con ello demostrar la efectividad de la metodología creada.

5.1 Creación de la metodología SFA + DS

En el primer capítulo se describieron las principales características y ventajas del uso de SFA, sin embargo, este enfoque tiene limitaciones importantes: (1) la herramienta no es capaz de modelar un conflicto inventivo y analizar las relaciones entre sus variables teniendo en cuenta la dimensión temporal [Delgado-Maciel et al., 2017]. Además, no tiene la capacidad de resolver problemas de manera simultánea, lo que genera una limitación para abordar problemas complejos [Terninko, 1998]. (2) El SFA opera de acuerdo con la lógica de TRIZ: resuelve problemas de manera secuencial. Esta condición aumenta la complejidad del proceso de toma de decisiones y (3) el proceso de resolución actual de TRIZ no cuenta con alguna técnica que permita evaluar cuál es el problema con el impacto positivo o negativo más significativo dentro del sistema, y por ello, el enfoque actual no permite al solucionador discernir cuál conflicto es el más importante.

Por las razones anteriores, no es posible realizar un análisis de los cambios que ocurren dentro del sistema a lo largo del tiempo, ni discernir el impacto entre las variables inmersas, ni formular una estrategia de selección entre varias soluciones potenciales [Delgado-Maciel et al., 2017]. Sin embargo, a lo largo de este

documento se ha mencionado que la Dinámica de Sistemas es una herramienta capaz de lidiar con la falta de dinamismo de TRIZ.

El SFA es una herramienta capaz de modelar un conflicto inventivo en un sistema a través de la interacción de varias funciones, con el propósito de vincular este problema a una estrategia de resolución específica. A su vez, la Dinámica de Sistemas puede modelar y simular el comportamiento del sistema, pero no ofrece alguna guía o herramienta para la resolución de problemas, ni para proponer soluciones inventivas.

5.1.1 Aplicaciones de SFA

Existen varios casos de aplicación del SFA en diversas áreas del conocimiento. [Helfman et al., 2015] proponen un modelado funcional en procesos de diseño. En este trabajo, los autores aplican el SFA en los sistemas biológicos que actúan en diversos campos y entornos para definir la ontología de las funciones biológicas. El resultado obtenido es un diseño biomimético a través de un caso de estudio.

Por otro lado, [Bultey et al., 2015] proponen una traducción del conocimiento terminológico y condicional del SFA en un lenguaje informático. La principal contribución del trabajo es la superación de la falta de estandarización y el uso empírico de las 76 soluciones estándar durante el proceso del SFA. El resultado final es una propuesta sistemática durante la aplicación de dichas soluciones.

[Yan et al., 2013] proponen en su investigación una estrategia para superar el nivel de abstracción en la implementación de los efectos físicos (una herramienta de SFA), ayudando a los usuarios a elegir el efecto apropiado según el contexto de la inventiva del problema.

[Nazidijazi et al., 2015] muestran en su investigación una contribución muy importante para la arquitectura, ya que a través del SFA resuelven problemas

inventivos que surgen durante el diseño arquitectónico. El resultado fue un método sistemático en este enfoque, representado a través de un estudio de caso implementado en estudiantes de diseño.

[Chen y Huang 2011] presentan una metodología de diseño eco-innovadora para apoyar a los diseñadores en el desarrollo de Sistemas de Producto – Servicio (PSS). Esta investigación analiza las principales características de los servicios, productos y el medio ambiente, a través de un método mediante el cual un diseñador puede identificar problemas y proporcionar soluciones innovadoras.

5.1.2 Metodología SFA + DS

La sinergia propuesta entre el SFA y la Dinámica de Sistemas (DS) ayuda al usuario en el proceso de toma de decisiones, a través del análisis del sistema a lo largo del tiempo. Aunque existen técnicas que involucran un proceso de simulación como una estrategia para proponer soluciones originales e inventivas, el enfoque propuesto en este capítulo, llamado SFM + DS, produce ventajas únicas que otras herramientas no poseen. La Tabla 5.1 muestra una breve comparación entre la simulación discreta (SD), el análisis de Campo - Sustancia (SFA), la Dinámica de Sistemas (DS) y una combinación del análisis de Campo - Sustancia y la Dinámica de Sistemas (SFA + DS) que es una de las metodologías del aporte de este trabajo de tesis.

Ventaja	SD	SFA	DS	SFA+DS
Modelación de problemas simultáneos	-	-	X	X
Modelación de sistemas complejos	X	X	X	X
Análisis mediante desempeño de funciones	-	X	-	X
Solución de problemas inventivos	-	X	-	X
Uso de herramientas para la simulación	X	-	X	X
Utilización de modelos matemáticos	X	-	X	X

Tabla 5.1 Comparación entre diferentes enfoques

Este capítulo propone la integración de los procesos de modelado del SFA con el enfoque de Dinámica de Sistemas. El producto de esta sinergia otorga algunas ventajas significativas: (1) permite el modelado de un problema inventivo mediante la interacción de algunas funciones. (2) La interacción de las funciones que rodea a un sistema produce suficiente información para generar un diagrama causal (CLD) y un modelo de simulación. (3) Una vez creado el modelo de una función, es posible identificar conflictos en el sistema y llevar a cabo una estrategia para transformar un estado indeseable de una función, en algo útil.

Además, este capítulo propone un caso de estudio que describe una situación que ilustra cómo las ventajas descritas son útiles para proponer una solución potencial y un mecanismo de evaluación de un diseño conceptual. La metodología central que se muestra en la Tabla 5.2 es la segunda metodología que forma el aporte de este trabajo de tesis, la cual se basa en el trabajo de [Terninko, 1998], [Salamatov, 1999], [Forrester, 1961] y [Sterman, 2000]. La metodología SFA + DS se muestra a continuación:

Fase 1. Descripción: Identificar los elementos	Fase 2. Formulación: Desarrollo de diagramas	Fase 3. Evaluación: Simular el modelo programado	Fase 4. Aplicación: Encontrar soluciones
1) Definir el propósito del modelo.	1) Desarrollar el diagrama de Forrester.	1) Simular el modelo y probar las relaciones causales del CLD y SFM.	1) Desarrollar al menos una solución.
2) Identificar las variables críticas.	2) Construir el modelo de SFM.	2) Probar el modelo bajo diferentes suposiciones.	2) Observación y análisis del modelo bajo diferentes escenarios
3) Establecer relaciones entre variables y desarrollar el CLD.	3) Comparación y verificación del diagrama de SFM y Forrester para asegurar la compatibilidad de ambos modelos.	3) Considerar las soluciones de las 76 soluciones estándar.	3) Validación de la solución.
4) Identificar las sustancias y el campo, interactuando dentro del modelo.			4) Recomendar la mejor alternativa.

Tabla 5.2 Metodología SFA + DS

5.2 Caso de estudio

A lo largo del tiempo se han aplicado las metodologías de Altshuller y Forrester. Ambos enfoques han evolucionado independientemente entre sí a través de sus aplicaciones en diferentes dominios. Sin embargo, aunque las metodologías del SFA y de Dinámica de Sistemas se desarrollaron hace varias décadas, la posibilidad de proponer una sinergia es un tema de investigación emergente. La Tabla 5.2 representa un marco inicial para implementar esta sinergia. En esta sección se muestra un caso de estudio que involucra el análisis de un objeto en el que hay conflictos inventivos: un marcador para pizarrón. El caso despliega la metodología propuesta en la Tabla 5.2 y discute su uso potencial para ayudar al diseño conceptual. El diseño conceptual es crucial para el proceso de desarrollo de un nuevo producto, ya que en la etapa inicial de diseño es en donde la singularidad de un producto o un servicio toma forma [Hartson y Pyla, 2019], [Pokojski et al. 2018].

5.2.1 Descripción: Identificar elementos

Durante la primera fase, el usuario debe analizar las relaciones causales entre las variables del sistema. Este análisis produce el diseño del diagrama causal (CLD). Además, esta fase permite la identificación de los componentes para la realización del Modelo de Campo – Sustancia (SFM). Los pasos durante la primera fase son:

(1) Definir el propósito del modelo: El objeto bajo análisis tiene varios componentes que involucran efectos deseables y negativos. El propósito del modelo es resolver conflictos inventivos y proponer al menos una solución que refleje una mejora en el objeto o proceso.

(2) Identificar variables críticas: el análisis del objeto requiere la identificación de dos tipos diferentes de variables: endógenas y exógenas. El primero involucra la parte física de los componentes del sistema. En un marcador, las variables endógenas son el volumen, la tapa, el cuerpo del objeto, el volumen del medio

absorbente, la superficie disponible para escribir información, el sujetador del medio absorbente, la información en la superficie disponible y el sujetador. Las variables exógenas del modelo tienen un significado más abstracto, el cual está relacionado con el efecto: rentabilidad, costo, preferencia del cliente, duración de la función útil principal haciendo varios registros de tinta a lo largo de la vida útil del objeto, daño ambiental, duración del olor, volumen de tinta y la demanda del producto. La figura 5.1 muestra los componentes básicos del objeto. Los nombres propuestos son genéricos, pero la terminología técnica está disponible en la patente US006048121A.

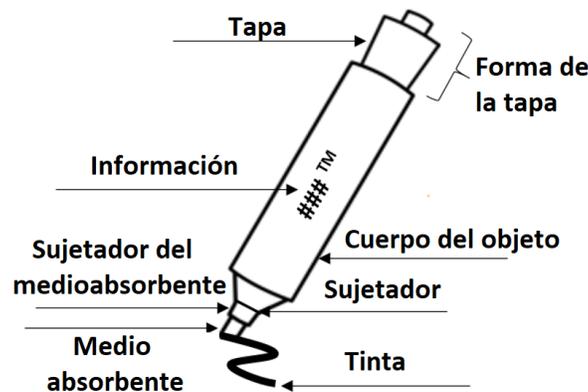


Figura 5.1 Partes físicas de un marcador

(3) Establecer las relaciones entre variables y desarrollar el CLD: Como se mencionó anteriormente, un CLD consiste en un gráfico orientado donde cada una de las flechas representa una relación causal que conecta las variables.

Cada enlace tiene una polaridad que muestra si es una implicación positiva o negativa. Los gráficos orientados permiten la identificación de los bucles de retroalimentación del sistema y los de balanceo también llamados de equilibrio. Los bucles de balanceo permiten la estabilización del sistema.

Vensim ® es un software capaz de representar los CLD y crear modelos de simulación dinámica. La Figura 5.2 muestra el CLD del objeto analizado.

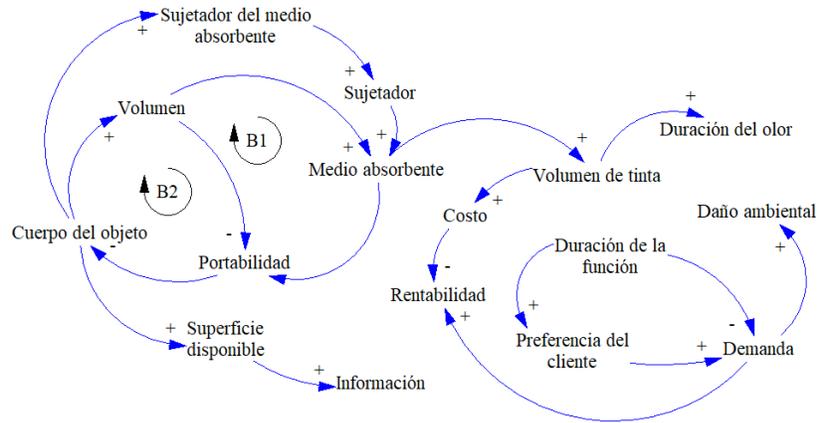


Figura 5.2 Diagrama Causal del marcador

Una breve explicación de cada bucle es la siguiente:

B2: Un aumento en las dimensiones del cuerpo del objeto, genera incremento en el volumen del objeto; sin embargo, reduce su portabilidad.

B1: Las variables de B2 están inmersas en B1. Sin embargo, hay una variable adicional: el volumen del medio absorbente. Un medio absorbente más grande puede almacenar más tinta y, por lo tanto, proporcionar al usuario que el objeto tenga una duración mayor. Este enlace aumentará la duración de la función útil. Sin embargo, si la portabilidad disminuye, genera una reducción en la preferencia del cliente por ser un objeto más difícil de almacenar o transportar.

Las descripciones de los bucles B1 y B2 generan las hipótesis dinámicas. Las hipótesis dinámicas son parte del enfoque sistémico propuesto por [Forrester, 1961]. Consisten en establecer textualmente cuál será el impacto en el sistema si una variable aumenta o disminuye. Además, las hipótesis dinámicas permiten el diseño de varios escenarios que permiten evaluar múltiples estrategias de solución. Los bucles B1 y B2 representan gráficamente los comportamientos dinámicos dentro del sistema.

(4) Identificar las sustancias y el campo, interactuando dentro del modelo: En el sistema, hay cinco sustancias que generan conflictos: el nivel de tinta (S_1), el medio absorbente (S_2), el cuerpo del objeto (S_3), el tapón (S_4), y la superficie donde

el usuario aplica cierta presión con el marcador al llevar a cabo la función del objeto de dejar un registro de tinta (S_5). Además, hay dos campos que interactúan con sustancias: campos gravitacionales (F_G) y campos mecánicos (F_M). Estas variables producen conflictos inventivos dentro del sistema.

5.2.2 Formulación: Desarrollo de diagramas

La segunda fase consiste en la construcción de diagramas correspondientes a los enfoques del SFA y Dinámica de Sistemas. Cada uno de ellos proporciona información sobre los conflictos en el sistema.

1) Desarrollar el diagrama de Forrester: La información que se muestra en el CLD se convierte en un Diagrama de Forrester (FD) utilizando el software de simulación dinámica Stella [®]. Las variables endógenas y exógenas se convierten en flujos, variables de nivel y variables auxiliares. El Diagrama de Forrester permite la introducción de algunas variables que no aparecen en el CLD original, como el radio, uso, límite, entre otras. Estas variables contribuyen a completar la información faltante dentro de la programación del modelo. La figura 5.3 muestra el FD.

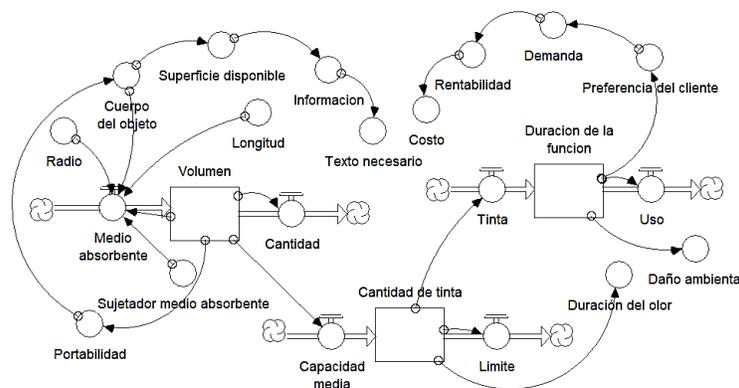


Figura 5.3 Diagrama de Forrester del marcador

Las variables de nivel duración de la función, volumen y cantidad de tinta generan ecuaciones diferenciales medidas con respecto al tiempo. Para el caso de estudio,

la ecuación más importante es el volumen, ya que involucra la portabilidad y el medio absorbente del objeto.

$$V(t) = V(t_0) + \int_0^t (A - Q)dt \quad \dots \quad (5.1)$$

La ecuación diferencial anterior muestra al volumen del objeto en función del tiempo, en donde: $V(t)$ = Volumen del objeto en cualquier instante, $V(t_0)$ = Volumen inicial, A = El tamaño del medio absorbente y Q = Cantidad de tinta. La capacidad de absorción del medio absorbente y el volumen determinan la cantidad de tinta en el interior. Además, el volumen del objeto está estrechamente relacionado con su portabilidad.

2) Construir el modelo de SFM: Una vez modelado el Diagrama de Forrester, el siguiente paso es construir el SFM.

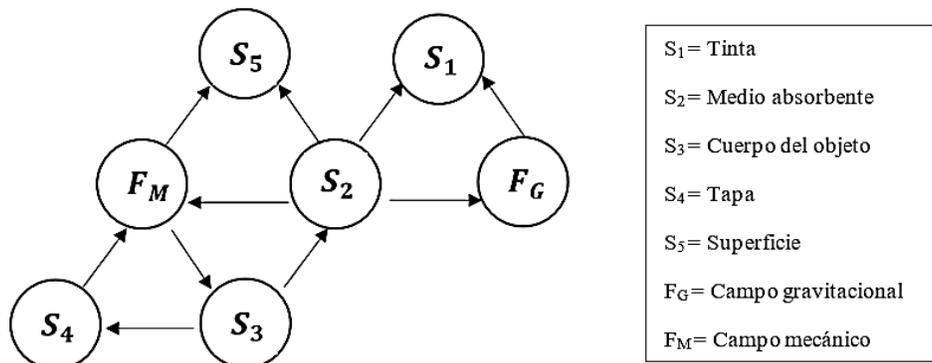


Figura 5.4 Las principales funciones útil del objeto

La figura 5.4 muestra el modelo del marcador de borrado en seco. Algunos elementos, como el sujetador del medio absorbente y la información (Figura 5.1), no se insertan explícitamente en el diagrama para facilitar la comprensión del modelo. A continuación, describen los campos y las sustancias:

- Campos: hay dos campos en el diagrama, mecánico (F_M) y gravitacional (F_G).

- Sustancias: la tinta (S_1) que contiene el medio absorbente, el medio absorbente (S_2) que almacena una cierta cantidad de tinta y tiene una punta en el extremo que interactúa con una superficie, el cuerpo del objeto (S_3) que contiene el medio absorbente y la tinta, además de contar con el sujetador que facilita la inserción del tapón, el tapón (S_4) que cubre la punta del medio absorbente para evitar daños y reducir la volatilidad de la tinta. Finalmente, está la superficie que recibe la función del objeto (S_5) a través de la interacción con la punta del medio absorbente.

Con esta información, es posible modelar la función útil principal del objeto. La figura 5.4 explica que un registro temporal sobre una superficie (la cual es la principal función útil) resulta de la interacción del medio absorbente (S_2) con la superficie (S_5) a través de un campo mecánico (F_M). También muestra que todos los componentes del sistema colaboran con al menos una función en el sistema. El diagrama muestra que el medio absorbente (S_2) interactúa con la tinta (S_1) a través de un campo gravitacional (F_G). El medio absorbente captura una cierta cantidad de tinta por capilaridad, y esta relación determina la durabilidad de la función útil. El cuerpo del objeto (S_3) contiene, mediante un campo mecánico (F_M), al medio absorbente (S_2). Esta relación es crucial para determinar el volumen del objeto y su portabilidad. El cuerpo del objeto (S_3) sujeta mediante un campo mecánico (F_M) al tapón (S_4). Por lo anterior, la figura 5.4 es una representación del sistema en su estado actual.

Sin embargo, el problema describe que es necesario aumentar la durabilidad del objeto (función útil principal). Para lograr este objetivo es necesario incrementar la capacidad del medio absorbente (S_2) o reponer la cantidad de tinta que sale del sistema cuando se cumple la función útil principal. Estas iniciativas generan un impacto negativo en el sistema: Cualquier aumento en el tamaño del medio absorbente (S_2) afecta al cuerpo del objeto (S_3). Si el volumen de tinta (S_1) supera el punto de saturación del medio absorbente (S_2), surge un riesgo de derrame. A su vez, si el objeto no está en uso y hay un volumen excesivo de tinta (S_1), el tapón (S_4) almacenará este exceso. Si el cuerpo del objeto (S_3) se vuelve fácil de desmontar, entonces aparecerá un posible riesgo de fuga de tinta (S_1). La Figura 5.5 muestra estos conflictos. Esta permite representar los problemas inventivos

encontrados a través del CLD. La tabla 3.1 mostrada en el Capítulo III, contiene la nomenclatura utilizada en SFM, cada flecha tiene un significado diferente dentro del modelo.

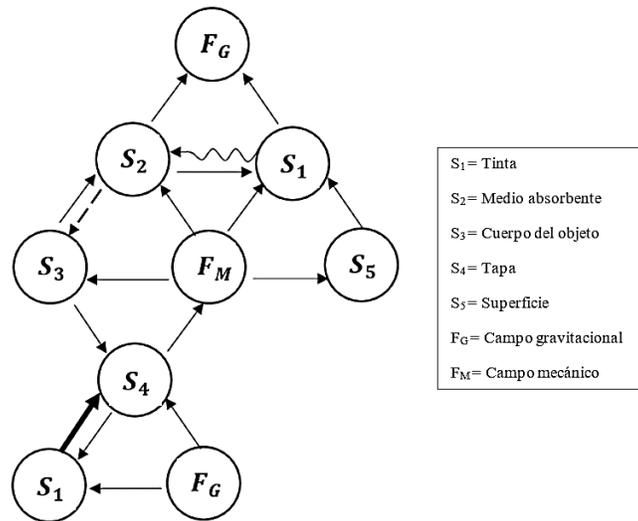


Figura 5.5 Modelado campo – sustancia (SFM)

Algunos problemas inventivos del sistema involucran el medio absorbente, el derrame de tinta, la longitud del objeto y el volumen de tinta. La Tabla 6 describe algunos problemas que surgen cuando aumentan las variables que tienen un efecto positivo en la duración de la función.

Conflicto	Diagrama	Problema inventivo
1		Un medio absorbente (S_2) más grande tiene mayor capacidad para contener una gran cantidad de tinta (S_1), pero aumenta las dimensiones del objeto, reduciendo la portabilidad. Por lo tanto, es necesario aumentar la cantidad de tinta sin añadir más materiales.
2		Un aumento en la cantidad de tinta (S_1) también aumenta la duración de la acción útil. Sin embargo, si es excesivo, entonces produce que la tinta se derrame fuera del cuerpo y se vaya al tapón (S_4) cuando marcador no esté en uso. Si tal condición llega, entonces la tinta fluirá fuera del cuerpo. Por ello, es necesario proponer un mecanismo para reemplazar la cantidad de tinta y evitar un exceso de líquido.

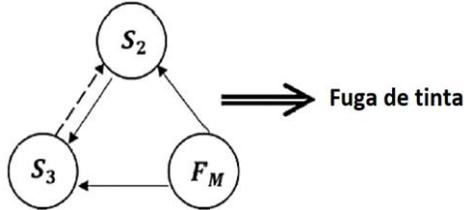
3		Si el cuerpo del objeto (S_3) se vuelve fácil de desmontar para renovar el cantidad de tinta en el medio absorbente (S_2), entonces no es posible asegurar la hermeticidad en el cuerpo.
---	---	--

Tabla 5.3 Conflictos inventivos del SFM

3) Comparación y verificación del diagrama de SFM y Forrester para asegurar la compatibilidad de ambos modelos: Según el enfoque Dinámica de Sistemas, el CLD es la base para generar el Diagrama de Forrester [Sterman, 2000]. Las variables del CLD y Diagrama de Forrester (Figuras 5.2 y 5.3) son equivalentes a las presentadas en el SFM (Figura 5.5). Las relaciones causales del Diagrama de Forrester y las funciones del SFM involucran las mismas variables. Debido a que los componentes y las variables funcionales son similares en ambos diagramas, genera una condición que aumenta la compatibilidad entre ambos enfoques.

5.2.3 Evaluación: Simular el modelo programado

La fase 3 utiliza el FD para simular las variables programadas. En esta tercera fase se efectúan simulaciones a través de Stella ®.

1) Simular el modelo y probar las relaciones del CLD y el SFM: La interfaz de Stella ® permite la creación de gráficos útiles para analizar el sistema. Un ejemplo de esto es la Figura 5.6, que representa el sistema en el estado actual. Un marcador de borrado en seco pesa inicialmente 22g y desciende a 15g una vez que está vacío (7g equivalen aproximadamente a 7ml de tinta considerando una densidad cercana a la densidad del agua). Según los resultados experimentales, el volumen de tinta utilizado por hora es de 0.2ml. Es interesante notar que, en México, un maestro de escuela primaria dedica 800 hr/año y trabaja más de 200 días. Algo parecido ocurre en el instituto donde trabaja un profesor 1047 hr/año, lo que produce un uso

promedio de 4.6 hr/día y un uso máximo de seis a ocho horas [OECD Indicadores, 2014]. Estas estadísticas son cruciales para estimar el tiempo de uso del marcador. En consecuencia, la tasa de uso oscila entre 0.2ml y 1.2ml diarios aproximadamente, lo que corresponde a una clasificación arbitraria de uso moderado (1 hr/día), uso regular (3 hr/día) y uso intensivo (6 hr/día). La figura 5.6 muestra cómo el uso afecta el volumen de tinta a lo largo del tiempo, considerando el uso de una a seis horas por día, y el uso promedio [OECD Indicadores, 2014].

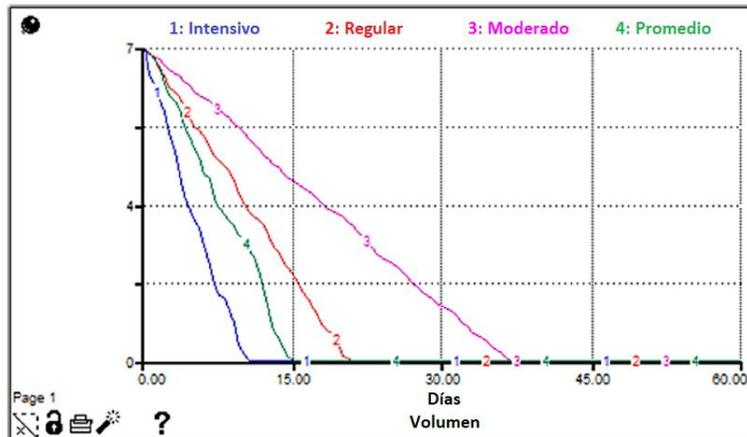


Figura 5.6 Comparación de usos del objeto

De acuerdo a la imagen anterior, el uso intensivo produce que la tinta se agote aproximadamente en el día 10 y el uso moderado supera el día 35. En esta etapa, el usuario puede modificar las variables programadas a través de la interfaz de Stella ®. Estas modificaciones producen nueva información sobre la relevancia del CLD y el modelo de simulación dinámica. Es en este paso donde el usuario puede observar el efecto que tiene cada problema en el sistema y luego, decidir cuál es el primer problema a resolver. La Tabla 5.3 se concentra en los conflictos más significativos que se hacen visibles en el CLD y el SFM. La cantidad de tinta en el objeto determina el alcance de la función útil principal. Por ello, para modificar el volumen de tinta en el sistema es necesario intervenir en el medio absorbente.

El SFM explica que los mecanismos que afectan el medio absorbente operan a través de dos campos: mecánico (F_M) y gravitacional (F_G) y dos sustancias, el cuerpo del objeto (S_3) y la cantidad de tinta (S_1). Estas relaciones ayudan a identificar el problema más significativo: un medio absorbente más grande (S_2) tendrá una mayor capacidad para contener una gran cantidad de tinta (S_1), pero

aumenta las dimensiones del cuerpo del objeto (S_3) reduciendo la portabilidad. Por tanto, es necesario aumentar o reponer la cantidad de tinta sin modificar el tamaño del cuerpo del objeto. Este es el primer conflicto listado en la Tabla 5.3 y, por tanto, el problema más relevante. El CLD y el SFM describen que el conflicto 2 en la Tabla 5.3 tiene algunas condiciones particulares. Por ejemplo, el SFM destaca que no hay contacto físico entre el medio absorbente y el tapón. Esta relación también se explica en el CLD, que no muestra ningún efecto entre el tapón y el medio absorbente. El efecto sobre el medio absorbente pasa a través del cuerpo del objeto, que sujeta mecánicamente el tapón. Este conflicto tiene una relevancia ligeramente menor que el primero. Por tanto, es el segundo problema relevante. Esta clasificación inicial determina la importancia del último conflicto en la Tabla 5.3.

2) Probar el modelo bajo diferentes supuestos: La siguiente etapa implica la simulación del modelo para probar diferentes escenarios. Este paso brinda más información para resolver los conflictos descritos en la Tabla 5.3. Sin embargo, la creación de un escenario es un proceso creativo, y existen dos conceptos de TRIZ que útiles para este paso: el sistema ideal y el uso de recursos. Los siguientes puntos describen el estado ideal del problema en el diseño:

- a) Es necesario aumentar o reemplazar la cantidad de tinta sin afectar la configuración actual del objeto. Así, el marcador reemplaza así mismo la cantidad correcta de tinta para asegurar la función útil, es decir, el volumen del marcador se adapta por sí solo a las necesidades del usuario.
- b) Sin la adición de otro componente, el marcador utiliza sus recursos disponibles para reemplazar la cantidad correcta de tinta.

3) Considerar las soluciones de las 76 soluciones estándar: Las 76 soluciones estándar son útiles para crear diferentes escenarios ya que son un conjunto de estrategias orientadas para transformar el sistema modelado. Cada conflicto en la Tabla 5.3 tiene al menos una coincidencia con un arquetipo de las 76 Soluciones Estándar, y cada uno de ellos propone una estrategia de resolución. El proceso de emparejamiento sigue el algoritmo [Savransky, 2000]. Además [Salamatov, 1999]

ofrece una descripción de la estructura general de estas estrategias de resolución y una explicación útil de cómo aplicar cada solución estándar. La Tabla 5.4 enlaza cada conflicto inventivo con una solución estándar:

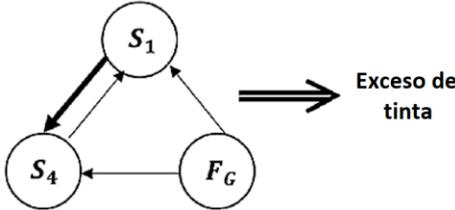
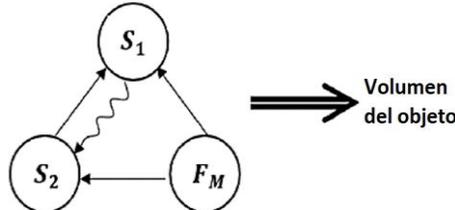
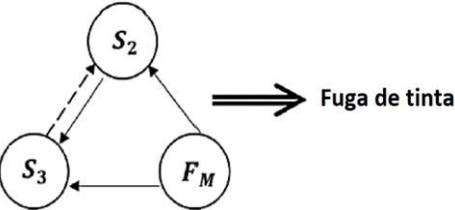
Conflicto	Diagrama	Solución estándar
1		<p>Este SFM puede ser resuelto usando clase 5: Ayudantes, particularmente el grupo 5-1 (introducciones de sustancias bajo condiciones restringidas). Una solución potencial es la solución estándar 5-1-1-3: "Si es necesario introducir una sustancia en el sistema, y no es permitida, una añadidura externa, se puede usar en su lugar una interna".</p>
2		<p>Este SFM puede ser resuelto usando clase 5: Ayudantes, a través dos soluciones del grupo 5-1 (introducción de sustancias bajo condiciones restringidas). La primera solución estándar es la 5-1-1-1: "Si es necesario introducir una sustancia en el sistema, y esto no está permitido, entonces se puede usar un "vacío" en lugar de la sustancia". Un "vacío" suele ser sustancia gaseosa, como el aire o bien el espacio vacío formado dentro de un objeto sólido. En algunos casos, un "vacío" puede ser formado por otras sustancias, como líquidos (espuma) o cuerpos sueltos. Otra solución estándar con potencial es la 5-1-1-2: "Si es necesario introducir una sustancia en el sistema, y esto no está permitido, un campo puede ser introducido en vez de la sustancia".</p>
3		<p>La solución estándar que permite resolver el conflicto 3 es similar a la del conflicto 2 (5-1-1-1): "Si es necesario introducir una sustancia en el sistema, y esto no está permitido, entonces se puede usar un "vacío" en lugar de la sustancia".</p>

Tabla 5.4 SFM y sus respectivas soluciones estándar

5.2.4 Aplicación: Encontrar soluciones

Para proponer al menos una solución, el solucionador o el equipo que trabaja en el proyecto debe adaptar la solución estándar para satisfacer los requisitos del problema. Es en esta etapa el esfuerzo creativo es de vital importancia. Las 76 Soluciones Estándar son un conjunto de abstracciones que el solucionador necesita adaptar en un contexto particular para materializar una solución específica. El papel de ellas es reducir el espacio de solución y ofrecer una estrategia de resolución previamente validada. La lógica detrás del proceso de solución de un SFM explica que si una función (problema a resolver) coincide con un modelo en particular, entonces su estrategia de solución asociada podría transferirse al problema a resolver.

1) Desarrollar al menos una solución: La adaptación de cada solución estándar a los conflictos enumerados en la Tabla 5.4 produce las siguientes soluciones potenciales.

Diseño conceptual 1: El primer problema inventivo surge de la necesidad de sustituir la cantidad de tinta en el objeto para ampliar la función útil principal. Cuando termina la función útil del objeto, no hay daños físicos. Por lo tanto, si el objeto cumple su función útil durante un período más largo, su impacto ambiental disminuye. Es fundamental enfatizar que el impacto ambiental no forma parte de este proyecto de tesis.

De acuerdo a la Tabla 5.4, la solución estándar 5-1-1-3 puede resolver el primer conflicto. Esta solución estándar establece que "Si es necesario introducir una sustancia en el sistema y no está permitido, entonces se puede utilizar un aditivo externo en lugar de uno interno". Por lo tanto, un elemento externo puede lograr el resultado deseado. El primer escenario de resolución consiste en un conjunto de pequeños contenedores (tipo tinteros) con diferentes colores de tinta para formar una base de recarga. El usuario coloca en los espacios correspondientes al marcador. La punta tiene un contacto físico con el líquido, de modo que el nivel de tinta del objeto aumenta por capilaridad mientras no está en uso (ver figura 5.7).

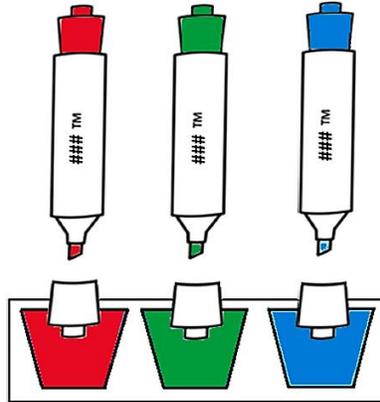


Figura 5.7 Representación del primer diseño conceptual

El objeto de la figura 5.7 permite al usuario recargar el nivel de tinta cuando el marcador no está en uso.

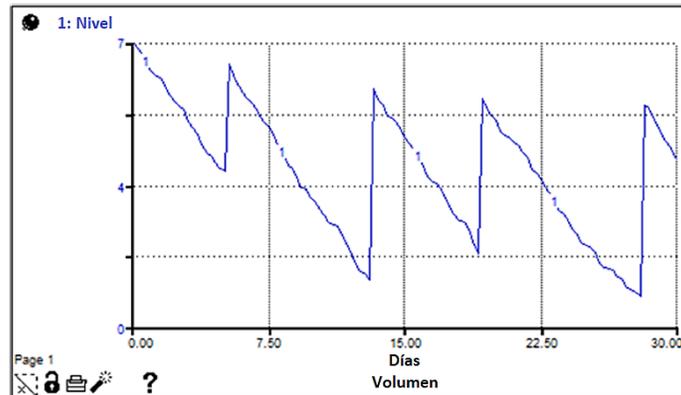


Figura 5.8 Consumo de tinta del primer diseño conceptual

Según la figura 5.8, el nivel de tinta (7ml) disminuye con el uso diario. En un período de simulación de 30 días, el usuario recarga el objeto hasta cuatro veces (una vez por semana) cerca del nivel máximo de carga (aproximadamente 7 ml, calculado por la diferencia de peso entre un objeto nuevo y uno vacío). Los resultados experimentales muestran que la capilaridad del objeto permite la recarga a una velocidad de 0.2ml por minuto. Por tanto, la recuperación del nivel de tinta es un proceso rápido que aumenta la vida útil del objeto en comparación con el gráfico de la figura 5.6 (ver solo la curva de uso intensivo). Otro aspecto a considerar es el hecho de que cada recarga de tinta (realizada en los días 13, 19 y 28 del período de simulación reflejados en la figura 5.7), no recarga el objeto a su nivel original

(7ml). Esto se debe al desgaste mecánico normal del objeto, principalmente en el medio absorbente. La figura 5.9 muestra el comportamiento del nivel de tinta durante un período de entre 50 y 60 días. En un período aproximado de dos meses, la punta del medio absorbente (responsable de conducir la tinta a una superficie) está lo suficientemente gastada como para que el usuario necesite deshacerse del objeto.

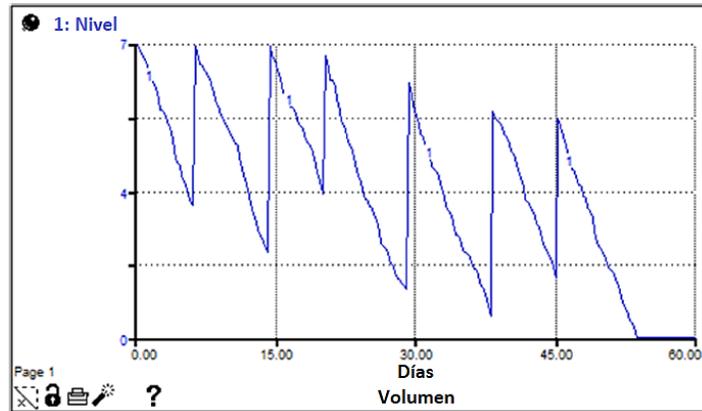


Figura 5.9 Límite máximo de consumo del primer escenario

Diseño conceptual 2: El segundo escenario involucra el mismo problema inventivo de extender la vida útil del objeto, pero enfrenta el conflicto 2. Según la Tabla 5.4, una posible solución estándar para resolver el segundo conflicto es la 5-1-1-1: “Si es necesario introducir una sustancia en el sistema, y no está permitido, se puede utilizar un “vacío” en lugar de la sustancia. Un "vacío" suele ser una sustancia gaseosa, como el aire, o un espacio vacío formado en un objeto sólido. En algunos casos, un "vacío" puede estar formado por otras sustancias, como líquidos (espuma) o cuerpos sueltos". El segundo diseño consiste en aprovechar el espacio disponible dentro del tapón para insertar una reserva de tinta (figura 5.10). El marcador aumenta su nivel de tinta gracias a un dosificador compuesto de una esponja y cubierto con una membrana para evitar el derrame de tinta. Las dimensiones que se muestran en la figura 5.11 permiten calcular la cantidad de tinta a partir del volumen de un tronco de cono (ecuación 5.2) y un cilindro (ecuación 5.3).

$$V(r, R, h) = 13 \pi h(R^2 + r^2 + Rr) \quad \dots \quad (5.2)$$

$$V(r, h) = \pi r^2 h \quad \dots \quad (5.3)$$

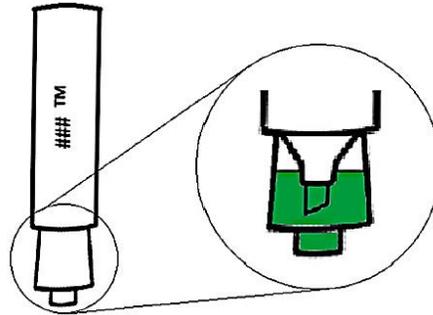


Figura 5.10 Representación del segundo diseño conceptual

La figura 5.11 muestra los diámetros (0.8 cm, 1.7 cm y 1.8 cm) y las alturas (1.1cm y 0.4cm) de la reserva de tinta. Es necesario subrayar que las ecuaciones 2 y 3 dependen de los radios. Por lo tanto, el volumen total es:

$2.64\text{cm}^3 + 0.201\text{cm}^3 = 2.841\text{cm}^3 = 2.841\text{ml}$ (considerando una densidad cercana a la densidad del agua).

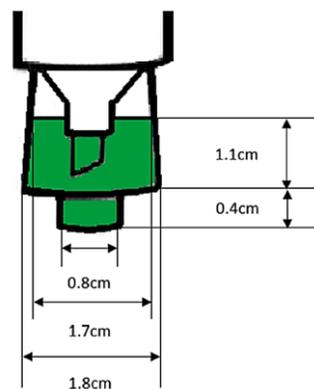


Figura 5.11 Dimensiones de la reserva de tinta

El gráfico del segundo diseño conceptual tiene un comportamiento diferente si se compara con el diseño anterior. Esto se debe a que el objeto se carga automáticamente mientras no está en uso. Por tanto, la reserva de tinta no descende en una sesión de trabajo. Para este escenario, el usuario utiliza el objeto diariamente y la tasa del consumo es aproximadamente de 0.2ml por hora (0.00334ml por minuto). Según los resultados experimentales, la capilaridad del objeto permite la recarga a razón de 0.2ml por minuto. La figura 5.12 muestra la variación del material de tinta en el segundo diseño conceptual.

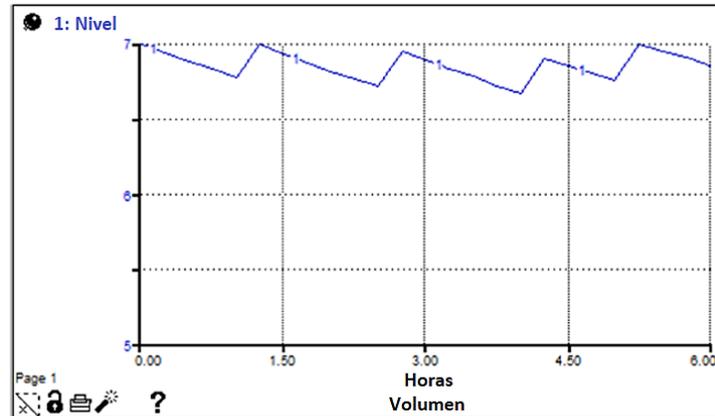


Figura 5.12 Consumo de tinta del segundo diseño conceptual

El horizonte de simulación corresponde a 6 horas (360 minutos). Es crucial notar que esta simulación usa horas en lugar de días debido a la velocidad de recarga. Si se usan los días como escala de tiempo, la curva de consumo es muy difícil de apreciarla. Por ello, la simulación en horas hace más comprensible la carga de tinta y el índice de consumo del marcador.

Después de usar el marcador, la reserva de tinta (ubicada en el tapón) recarga el nivel de tinta cerca del nivel original (7ml). El usuario recarga el objeto varias veces durante el período de 6 h. La tasa de uso es aproximadamente de 0.00334ml por minuto, lo que implica que un volumen necesario de 1.2024ml durante 6 horas. Según las ecuaciones 2 y 3, el volumen de la tinta de reserva (2.841 ml) es suficiente para satisfacer los requisitos de uso en 6 horas (1.2024 ml), incluso es suficiente para satisfacer aproximadamente hasta 14 horas de uso.

Una vez que se agota el volumen extra de la reserva de tinta, el objeto continúa con su uso normal, considerando la tasa de uso normal promedio de 0.2 ml por minuto (ver figura 5.13) hasta que llega aproximadamente a cero y se desecha después de 72 horas de uso continuo (12 días de uso considerando 6 horas por día). Este diseño conceptual permite extender el período de vida del objeto en aproximadamente dos días más.

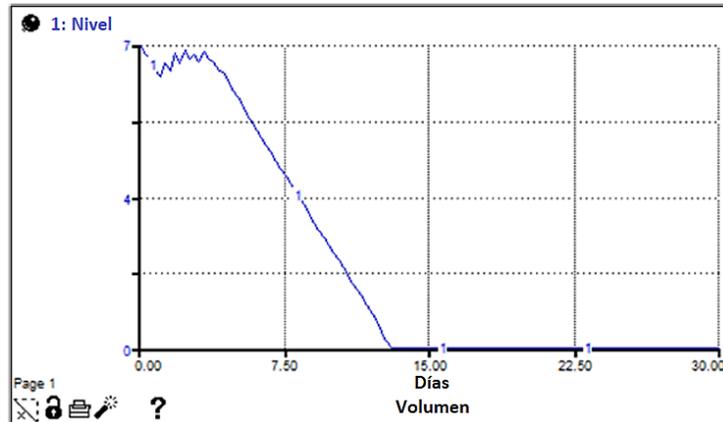


Figura 5.13 Límite máximo de consumo del segundo escenario

Diseño conceptual 3: Un tercer diseño conceptual permite la posibilidad de disponer de un stock de tinta para dar una segunda vida al objeto. Esta propuesta de diseño es una posible solución al conflicto 3 (Tabla 5.4) porque involucra la cantidad de sustancia y la duración de la función principal (la vida útil del objeto). Una posible solución estándar para resolver el tercer conflicto es la 5-1-1-1 definida en el diseño conceptual 2.

Una pequeña cápsula esférica colocada al final del cuerpo del objeto permite tener una reserva de tinta para ser utilizada cuando el nivel de tinta original disminuya. El usuario rompe la cápsula esférica (Mediante un giro manual en la línea punteada). El medio absorbente absorbe la tinta adicional por capilaridad (ver figura 5.14). La fórmula matemática para calcular el volumen esférico es:

$$V(r, h) = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \dots \quad (5.4)$$

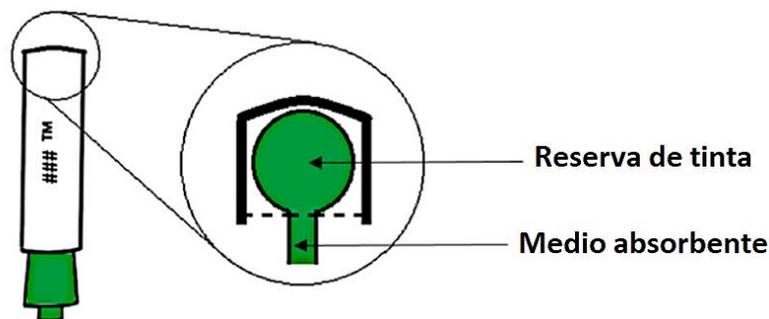


Figura 5.14 Representación del tercer diseño conceptual

El radio de la cápsula esférica mide aproximadamente 0.62 cm, por ello la ecuación 4 estima un volumen aproximado de 0.99 ml \approx 1ml. El volumen de la cápsula esférica (1ml) representa aproximadamente cinco horas extras de uso (considerando la tasa mencionada anteriormente de 0.2ml por hora). La figura 5.15 representa el nivel medio de tinta de un marcador (7 ml) y su tasa de consumo hasta el final de su vida útil (aproximadamente diez días utilizando el marcador durante 6 horas cada día). La vida útil aumenta al romper el stock de tinta adicional (cápsula esférica), que recarga el stock aproximadamente un 8,3% del nivel original. Por lo tanto, el objeto funciona para la segunda (y última) ocasión y luego puede desecharse (ver figura 5.15). Esta figura muestra la recarga de tinta el día 7 y refleja el aumento en el nivel de tinta que permite prolongar la vida del objeto en aproximadamente un día más.

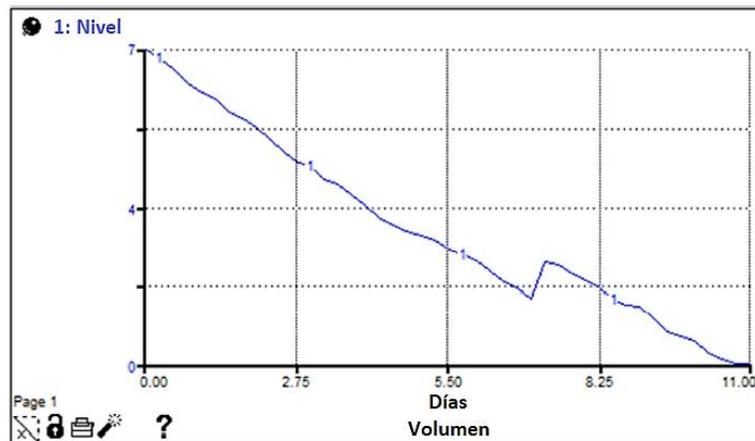


Figura 5.15 Límite máximo de consumo del tercer escenario

2) Observación y análisis del modelo bajo diferentes escenarios: La interfaz de Stella ® permite la evaluación de diferentes escenarios simultáneos para comparar varias alternativas de diseño. El usuario puede analizar cualquier variable del Diagrama de Forrester y evaluar cualquier escenario de acuerdo con los parámetros de entrada que inserta en la interfaz. La figura 5.16 permite la observación simultánea de cada diseño conceptual en 30 días, teniendo en cuenta un uso intensivo de seis horas en todos los casos. Las herramientas visuales de Stella ® facilitan el análisis de los escenarios que incluyen el análisis de sensibilidad, que es una forma de observar el impacto que produce cualquier cambio en las variables.

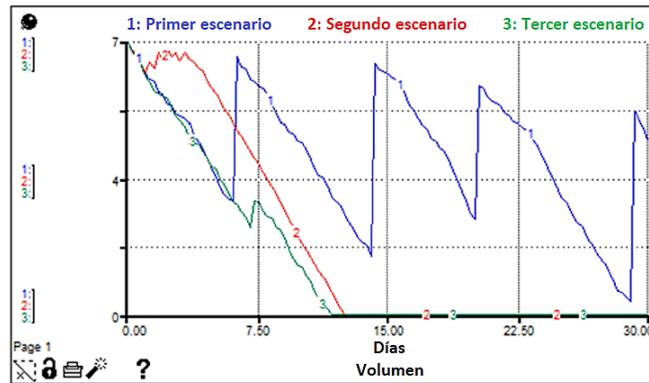


Figura 5.16 Comparación gráfica de los diseños conceptuales

Según la figura 5.16, el primer diseño conceptual extiende la duración del marcador más que las otras dos alternativas. Sin embargo, el primer diseño conceptual implica la producción de un segundo objeto, lo que exige un nuevo modelo de negocio que debe demostrar su viabilidad económica. Una ventaja del primer diseño conceptual es que no perturba el sistema de producción ni afecta ningún atributo físico del marcador. Además, el primer diseño conceptual presenta un desafío porque el objeto debe ser lo suficientemente flexible en su diseño para adaptar su función útil principal a otros marcadores de borrado en seco disponibles en el mercado.

El segundo y tercer diseño conceptual extienden la vida útil del objeto sin la necesidad de agregar ningún componente externo como el primer diseño, pero implican algunos cambios menores en el diseño del marcador.

El segundo diseño conceptual tiene un mejor desempeño que el tercer escenario. Además, solo afecta al tapón, que es un objeto que no está adherido permanentemente al marcador, en ese sentido, el tapón se considera un objeto independiente. Este diseño conceptual no perturba el sistema de producción del marcador, y la solución tiene lugar después de que se produce el objeto. Sin embargo, el segundo escenario agrega otras actividades a la producción del objeto que aumentan el costo de producción.

El tercer diseño conceptual exige una pequeña modificación en el marcador porque la solución se implementa dentro del cuerpo del objeto. Por lo tanto, es indispensable evaluar los cambios necesarios en el sistema de producción, lo que denota una implementación un poco más complicada.

La información sobre la comparación de escenarios es útil en la construcción física de prototipos. Este paso considera la elaboración física de prototipos, que es útil para validar varios parámetros técnicos y produce retroalimentación para el proceso de diseño. Sin embargo, la ventaja de la simulación es que permite el análisis visual y matemático de los mejores diseños conceptuales.

El resultado obtenido es una retroalimentación y un retorno de experiencias útiles para mejorar el proceso de diseño e identificar nuevas oportunidades. La retroalimentación conduce a una pregunta interesante: ¿Es posible combinar el diseño conceptual dos y tres? ¿Cuál es el efecto en el sistema? La figura 5.17 muestra la implementación del segundo y tercer escenario para crear un producto de mayor duración.

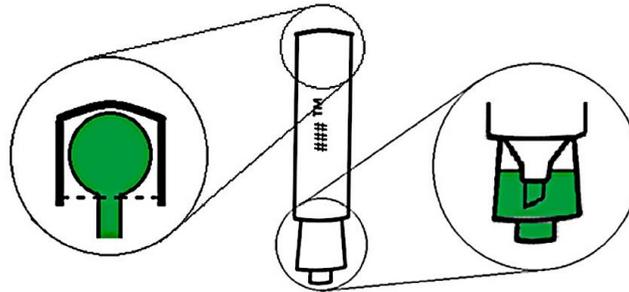


Figura 5.17 Diseño conceptual combinado

El diseño conceptual final genera un nuevo gráfico que se refleja en la figura 5.18.

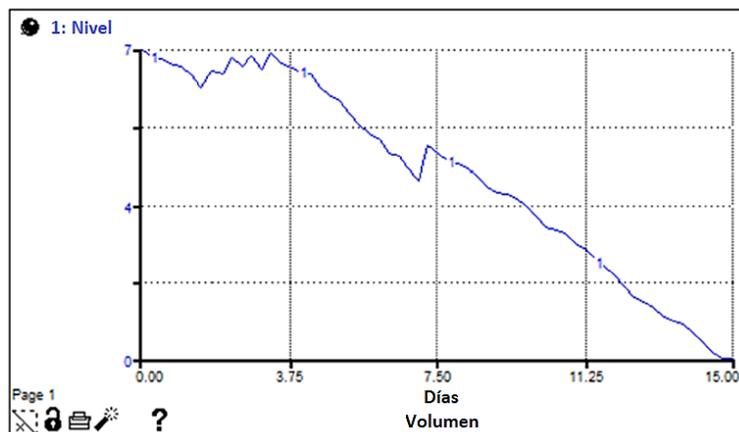


Figura 5.18 Consumo de tinta del diseño conceptual combinado

Según esta figura, el objeto obtiene una recarga continua los primeros días debido al uso del stock de tinta (figura 5.11) y una recarga adicional el día 7 debido al uso de la tinta almacenada en la cápsula esférica. En estas condiciones, el marcador alcanza casi los 15 días de uso, como se muestra en la figura 5.18.

La figura 5.18 muestra el llenado de tinta del objeto durante los primeros 3 días a través de la reserva de seguridad de la tinta descrita en el segundo diseño conceptual. Posteriormente, el objeto adquiere una cantidad extra de tinta en el día 7 a través de la cápsula esférica. La combinación de ambas soluciones extiende la vida útil del objeto en aproximadamente 4 o 5 días en comparación con las que se muestran en la figura 5.6.

3) Validación de la solución: Una estrategia eficaz para validar la solución es introducir los nuevos datos en la interfaz de Stella® y simular el efecto de cualquier diseño conceptual. Sin embargo, necesario validar si la adaptación de la Solución Estándar para el SFM tiene el resultado esperado a través de herramientas estadísticas.

La prueba t – pareada permite realizar una comparación entre los datos del prototipo físico construido, a partir del diseño conceptual final (X_j), con los datos obtenidos del modelo de simulación (Y_j). A partir del valor estadístico – t, y del análisis de varianza, la prueba genera intervalos que validan si los datos obtenidos del modelo de simulación son estadísticamente válidos para representar la realidad del sistema. La Tabla 5.5 y las ecuaciones 5 y 6 muestran el desarrollo de la prueba t – pareada. Esta prueba permite comparar el nivel de tinta entre el prototipo real y los resultados de la simulación.

Día	X_j	Y_j	$Z_j = X_j - Y_j$
0	7.00	7.00	0.00
1	6.96	6.38	0.58
2	6.81	6.75	0.06
3	6.91	6.76	0.16
4	6.40	6.36	0.04
5	5.73	5.76	-0.03
6	5.15	4.96	0.20
7	5.06	5.28	-0.22
8	4.40	4.36	0.04

9	3.77	3.81	-0.04
10	3.24	3.20	0.04
11	2.32	2.43	-0.11
12	1.75	1.71	0.04
13	0.98	1.06	-0.08
14	0.47	0.42	0.05
15	0.11	0.00	0.11
Media aritmética (Z_m)			0.05297

Tabla 5.5 Prueba estadística t – pareada (parte 1)

Según la Tabla 5.5, la media aritmética de la columna Z_j es 0.05297 (Z_m). Este valor es necesario para calcular la suma de cuadrados de la diferencia entre Z_j y su media aritmética (Z_m), y posteriormente, la media aritmética de estas operaciones (ver la tabla 5.6).

Día	X_j	Y_j	$Z_j = X_j - Y_j$	$Z_j - Z_m$
0	7.00	7.00	0.00	0.0028
1	6.96	6.38	0.58	0.2751
2	6.81	6.75	0.06	0.0001
3	6.91	6.76	0.16	0.0104
4	6.40	6.36	0.04	0.0001
5	5.73	5.76	-0.03	0.0065
6	5.15	4.96	0.20	0.0202
7	5.06	5.28	-0.22	0.0745
8	4.40	4.36	0.04	0.0002
9	3.77	3.81	-0.04	0.0086
10	3.24	3.20	0.04	0.0002
11	2.32	2.43	-0.11	0.0250
12	1.75	1.71	0.04	0.0001
13	0.98	1.06	-0.08	0.0164
14	0.47	0.42	0.05	0.0000
15	0.11	0.00	0.11	0.0033
Sumatoria (Σ):				0.4435

Tabla 5.6 Prueba estadística t – pareada (parte 2)

Las ecuaciones 5.5 y 5.6 muestran el cálculo de la varianza (ecuación 5.5) y el intervalo de confianza (ecuación 6). El valor t estadístico para un intervalo de confianza del 90% es $t_{15, 0.05} = 1.753$ ($t_{n-1, 1-\alpha/2}$).

$$\text{Var}(Z_m) = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - Z_m]^2}{n(n-1)} \quad \dots \quad (5.5)$$

$$Z_m \pm t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\text{Var}(Z_m)} \quad \dots \quad (5.6)$$

De acuerdo a la ecuación 5, la varianza es:

$$\text{Var}(Z_m) = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i - Z_m]^2}{n(n-1)} = \frac{0.4435}{16(16-1)} = \mathbf{0.001847}$$

En base a lo anterior, el intervalo de confianza se obtiene en la ecuación 6:

$$Z_m \mp t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\text{Var}(Z_m)} = 0.05297 \mp (1.753) \sqrt{0.001847} = \mathbf{0.05287 \mp 0.07533}$$

El resultado anterior produce un intervalo de confianza: **(-0.0224, 0.1282)** que incluye el valor de cero. Por tanto, el modelo de simulación tiene una confiabilidad del 90% y por ende es estadísticamente válido.

Cabe mencionar que como parte de la validación del modelo, también se ocupó la prueba de condiciones extremas mencionada en la sección 1.1.3. Esta prueba se lleva a cabo asignando valores máximos, mínimos y las posibles combinaciones entre ellos a las variables de interés. La prueba tiene la finalidad de determinar que las variables de salida sean aceptables de acuerdo al modelo planteado. Esta prueba es de gran importancia porque permite detectar posibles fallas en la estructura del modelo, ya que someter la simulación a una condición extrema puede poner en manifiesto ciertos errores de planteamiento. Además, operar el modelo con valores fuera de los límites convencionales, incrementa la mejora del mismo ya

que permite descubrir nuevas políticas que desplacen el comportamiento actual del sistema y hallar nuevas oportunidades de mejora en el modelo.

4) Recomendar la mejor alternativa: La comparación de los escenarios propuestos permite al usuario evaluar las alternativas. El primer escenario es la mejor alternativa si no es posible modificar el objeto o el sistema de producción, entonces el primer escenario es factible. Sin embargo, para ello es necesario producir un accesorio completamente nuevo que complementa al marcador.

Por el contrario, si es posible llevar a cabo cambios menores en el diseño del objeto, entonces el segundo escenario es interesante, ya que todos los cambios necesarios pueden llevarse a cabo una vez que el objeto es un producto terminado. Por tanto, esta solución se puede aplicar a otros productos similares. El último escenario y la combinación de los escenarios 2 y 3 demandan modificaciones en el sistema de producción y el objeto, dependerá de las decisiones gerenciales de la empresa apostar por estos escenarios o no hacerlo.

Conclusión del capítulo V

La metodología SFA + DS representa una oportunidad de investigación debido a la capacidad de cubrir dos áreas diferentes de conocimiento a través de un solo enfoque. Proporciona una nueva herramienta para resolver ciertos tipos de sistemas complejos: problemas relacionados con el análisis de funciones y la simulación dinámica. Cada una de las fases muestra la compatibilidad entre ambas técnicas que generan una metodología capaz de dar solución a problemas inventivos.

Los resultados de esta integración generan una valiosa contribución para el usuario, ya que le permite modelar y simular un problema inventivo.

Quizás la principal contribución de Dinámica de Sistemas a SFA es la capacidad para modelar un sistema y poder cuantificarlo a través de ecuaciones, dando soporte matemático para el proceso de modelado en TRIZ. La sinergia entre SFA y DS se da gracias a que ambas técnicas tienen algunos pasos comunes dentro de sus metodologías, particularmente durante la etapa de modelado que involucra la representación de las variables que forman el sistema, dando lugar al SFM y al CLD. Además, la Dinámica de Sistemas aporta mucho al SFA ya que permite analizar las relaciones causales y darles seguimiento a través del tiempo, originando información relevante que da como resultado tener una mejor perspectiva del problema inventivo y las condiciones que lo rodean.

A su vez, el análisis de sensibilidad juega un papel esencial porque permite la evaluación de diferentes escenarios y guía al usuario en el proceso de resolución a través de interfaces gráficas que Stella ® permite realizar. Finalmente, la última fase implica un proceso de toma de decisiones en el que el usuario evalúa la mejor solución basándose en simulaciones anteriores, por lo que la metodología creada (SFA + DS) es una herramienta poderosa que tiene brinda un nuevo enfoque en la solución de problemas inventivos.

Conclusiones generales

La sinergia entre TRIZ y Dinámica de Sistemas genera una oportunidad en la investigación para proponer nuevos métodos y presenta nuevos recursos en la resolución de problemas inventivos. La ventaja más significativa de esta sinergia es brindar al usuario una estructura formal para modelar problemas inventivos y simular sus relaciones con el objetivo de observar el cambio del sistema a través del tiempo, además de darle un sustento matemático que proviene del enfoque de la simulación dinámica. Anteriormente, estas características no estaban presentes en TRIZ.

A su vez, la Dinámica de Sistemas amplía su campo de aplicación mediante la asimilación de algunas herramientas para la resolución de problemas inventivos, ya que integra herramientas propias de TRIZ que le permiten abarcar nuevos horizontes.

Las metodologías propuestas en este trabajo de tesis, tienen como objetivo demostrar la viabilidad de combinar TRIZ y Dinámica de Sistemas. El principal aporte de este trabajo fue la demostración de un beneficio mutuo entre ambas técnicas. Antes del desarrollo de este proyecto, el Análisis del Campo – Sustancia (SFA) tenía importantes limitaciones, quizás la más relevante era su incapacidad para analizar sistemas con variables continuas. Además, el análisis de contradicciones físicas y técnicas carecía de dinamismo, el cual obtuvo con la integración de la simulación continua en la metodología mostrada.

Este trabajo de tesis aportó al conocimiento un proceso de modelado más rico y flexible, ya que permite que ambas técnicas superen sus limitaciones apoyándose mutuamente. Bajo este esquema, el usuario ahora cuenta con la capacidad de modelar un producto o un proceso desde la perspectiva de TRIZ y analizarlo a través del tiempo mediante el enfoque de Dinámica de Sistemas y con ello obtener una estrategia de solución al problema inventivo que se presenta.

Recomendaciones y trabajo futuro

El análisis temporal de variables que se mostraron en este trabajo de tesis, representa un proceso de modelado de sistemas y problemas inventivos no descrito en la literatura anteriormente, el cual es un proceso más rico y flexible que tiene varias aplicaciones.

El trabajo futuro sugiere utilizar las metodologías mostradas para resolver problemas con un mayor grado de complejidad. Existen procesos de fabricación y servicios, así como el diseño de nuevos productos con muchos conflictos, que se modelan como problemas inventivos. Estos problemas exigen un análisis de su comportamiento a lo largo del tiempo. Por lo anterior, la próxima meta consiste en aplicar las metodologías para resolver conflictos generados en el diseño de nuevos productos o la mejora de procesos. Estas aplicaciones tienen un mayor número de variables y, por tanto, habrá un mayor número de interacciones en un sistema.

Por el momento, las metodologías solo muestran la sinergia entre TRIZ y Dinámica de Sistemas en lo referente al análisis de contradicciones físicas y técnicas, y en el Análisis Campo – Sustancia (SFA).

Sin embargo, existe una tercera técnica dentro de la caja de herramientas de TRIZ: El análisis de Tendencias de Evolución (ToE). La teoría TRIZ señala que, en apariencia, la evolución de un producto o una tecnología se realiza de manera aleatoria, pero si se abre la perspectiva histórica del análisis, será posible apreciar que este fenómeno no es del todo aleatorio. Para confirmar esta hipótesis, Altshuller y otros investigadores [Terninko et al., 1998; Orloff, 2010; Savransky, 2000] realizaron un profundo análisis en las bases de patentes con el objetivo de identificar estos patrones o comportamientos de evolución. Esta tercera herramienta de TRIZ también cuenta con el potencial de hacer una tercera metodología con Dinámica de Sistemas y con ello analizar el comportamiento temporal de la evolución de los patrones de un producto o proceso. TRIZ y Dinámica de Sistemas son técnicas capaces de incluir nuevos enfoques de otras herramientas de conocimiento como se ha demostrado a lo largo de este proyecto de tesis.

Anexos

Anexo A. Productos académicos: Journals

A comparison between the Functional Analysis and the Causal-Loop Diagram to model inventive problems

Available online at www.sciencedirect.com**ScienceDirect**

Procedia CIRP 70 (2018) 259–264

www.elsevier.com/locate/procedia

28th CIRP Design Conference, May 2018, Nantes, France

A comparison between the Functional Analysis and the Causal-Loop Diagram to model inventive problems

Jesús Delgado-Maciel^{a*}, Guillermo Cortés-Robles^a, Giner Alor-Hernández^a, Jorge García Alcaráz^c, Stéphane Negny^b^aTecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Orizaba, Avenida Oriente 9 No. 852 Col. Emiliano Zapata, Orizaba 94320, México^bInstitut National Polytechnique de Toulouse CNRS UMR 5503, PSI/Génie Industriel- INPT-ENSIACET 118 Route de Narbonne, Toulouse 31077, France^cDepartment of Industrial Engineering and Manufacturing – Institute of Engineering and Technology – Autonomous University of Ciudad Juárez, Avenida del Charro No. 450 Norte Col. Partido Romero, Ciudad Juárez 32310, Mexico* Corresponding author. Tel.: +52-272-725-7056; fax: +52-272-725-7056. E-mail address: jdelgadom@ito-depi.edu.mx

Abstract

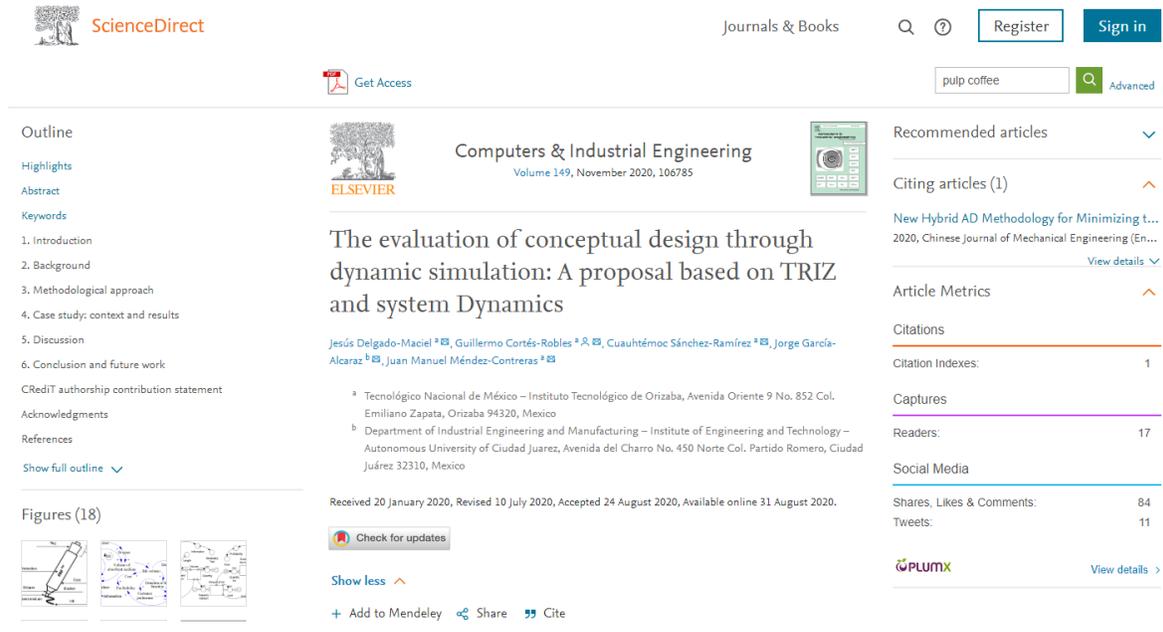
The pressure of the market, the exigencies of the society, and the environmental restrictions ask for new problem-solving approaches. In this context, the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) offers several advantages: it is a knowledge-based approach for problem-solving that links the problem requirements with some engineering models to guide the solving process. However, the learning process of TRIZ and its use with a practical purpose reveal many drawbacks. A significant problem, while using TRIZ, emerges when the user needs to analyze and formulate an inventive problem. To deal with this issue, a combination of TRIZ with other tools seems the best strategy. The use of the Functional Analysis (FA) is one of the best examples. Despite the usefulness of the FA technique, a difficulty remains: it is a complex task to model the causal relationship between several parameters or conditions within a system. However, a tool used in the System Dynamics Modeling deals well with this situation. The System Dynamics (SD) analyzes the nonlinear behavior of complex systems over time. Congruent with recent TRIZ advances, the SD is a computer aided-approach with an extended application domain, practically in any complex system-social, managerial, economic or natural system defined by some relationships, a flow of information, and some effects of causality. Hence, SD can produce useful information when there are several conflicts in a system, also called a problem network. SD uses a graphical tool to model the variables and states of a system: The Causal-Loop Diagram. This tool is helpful to explain a conflict, the change of a system, or merely the interactions that take place to obtain an effect. This article presents a comparison between the Functional Analysis and the Causal-Loop Diagram to model inventive problems.

© 2018 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 28th CIRP Design Conference 2018.

Keywords: Modeling; Design method; Analysis

The evaluation of conceptual design through dynamic simulation: A proposal based on TRIZ and system Dynamics



ScienceDirect Journals & Books

Get Access

Register Sign in

Search: pulp coffee

Outline

- Highlights
- Abstract
- Keywords
- 1. Introduction
- 2. Background
- 3. Methodological approach
- 4. Case study: context and results
- 5. Discussion
- 6. Conclusion and future work
- CRedit[®] authorship contribution statement
- Acknowledgments
- References

Show full outline

Figures (18)

Computers & Industrial Engineering
Volume 149, November 2020, 106785

The evaluation of conceptual design through dynamic simulation: A proposal based on TRIZ and system Dynamics

Jesús Delgado-Maciel^a, Guillermo Cortés-Robles^a, Cuauhtémoc Sánchez-Ramírez^a, Jorge García-Alcaraz^b, Juan Manuel Méndez-Contreras^a

^a Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Orizaba, Avenida Oriente 9 No. 852 Col. Emiliano Zapata, Orizaba 94320, Mexico
^b Department of Industrial Engineering and Manufacturing – Institute of Engineering and Technology – Autonomous University of Ciudad Juarez, Avenida del Charro No. 450 Norte Col. Partido Romero, Ciudad Juárez 32310, Mexico

Received 20 January 2020, Revised 10 July 2020, Accepted 24 August 2020, Available online 31 August 2020.

Check for updates

Show less

Add to Mendeley Share Cite

Recommended articles

Citing articles (1)

New Hybrid AD Methodology for Minimizing t...
2020, Chinese Journal of Mechanical Engineering (En...
View details

Article Metrics

Citations

Citation Indexes: 1

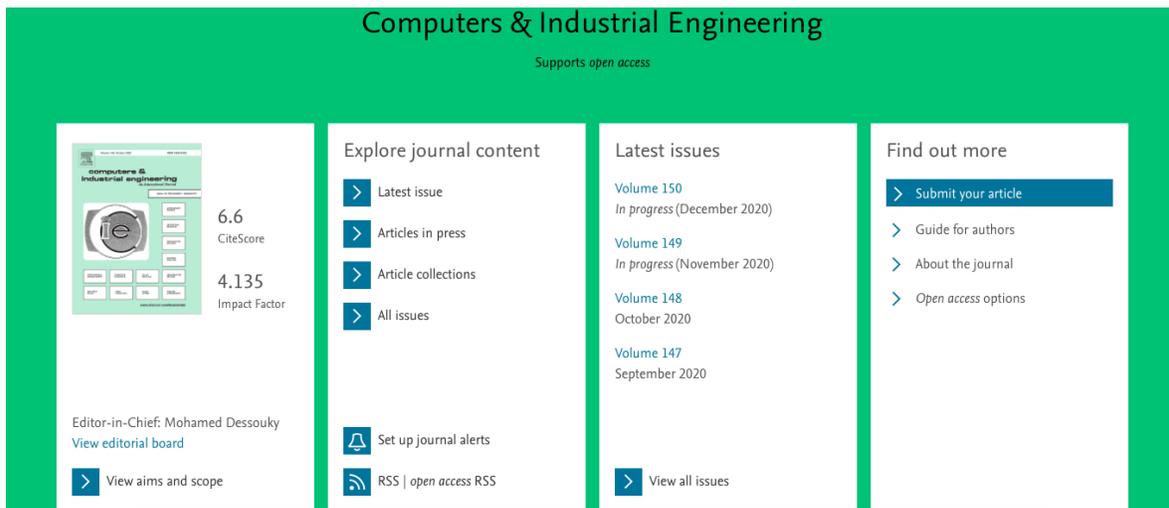
Captures

Readers: 17

Social Media

Shares, Likes & Comments: 84
Tweets: 11

PLUMX View details



Computers & Industrial Engineering

Supports open access



6.6
CiteScore

4.135
Impact Factor

Editor-in-Chief: Mohamed Dessouky
View editorial board

View aims and scope

Explore journal content

- Latest issue
- Articles in press
- Article collections
- All issues

Set up journal alerts

RSS | open access RSS

Latest issues

Volume 150
In progress (December 2020)

Volume 149
In progress (November 2020)

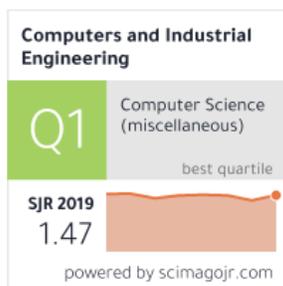
Volume 148
October 2020

Volume 147
September 2020

View all issues

Find out more

- Submit your article
- Guide for authors
- About the journal
- Open access options



Computers and Industrial Engineering

Q1 Computer Science (miscellaneous)
best quartile

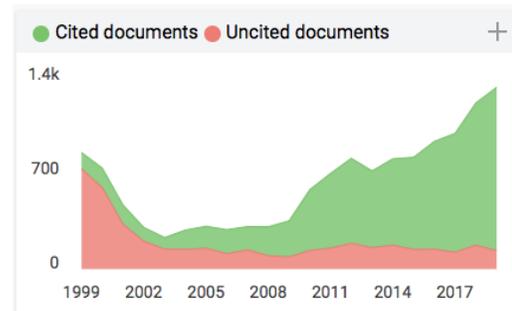
SJR 2019
1.47

powered by scimagojr.com

Show this widget in your own website

Just copy the code below and paste within your html code:

```
<a href="https://www.scimagojr.com" data-bbox="355 820 505 832">
```



Anexo B. Productos académicos: Congresos internacionales

Application of the Systems Dynamics Approach to Model Inventive Problems



[International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems](#)
HAIS 2017: [Hybrid Artificial Intelligent Systems](#) pp 494-506 | [Cite as](#)

Application of the Systems Dynamics Approach to Model Inventive Problems

Authors Authors and affiliations

Jesús Delgado-Maciel, Guillermo Cortes-Robles , Emilio Jiménez Macias, Cuauhtémoc Sánchez-Ramírez,
Jorge García-Alcaraz

Conference paper
First Online: 02 June 2017

 2	 4	 1.3k
Citations	Readers	Downloads

Part of the [Lecture Notes in Computer Science](#) book series (LNCS, volume 10334)

About this paper

Cite this paper as:
Delgado-Maciel J., Cortes-Robles G., Macias E.J., Sánchez-Ramírez C., García-Alcaraz J. (2017) Application of the Systems Dynamics Approach to Model Inventive Problems. In: Martínez de Pisón F., Urraca R., Quintián H., Corchado E. (eds) Hybrid Artificial Intelligent Systems. HAIS 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10334. Springer, Cham

First Online 02 June 2017	DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-59650-1_42	Publisher Name Springer, Cham
Print ISBN 978-3-319-59649-5	Online ISBN 978-3-319-59650-1	eBook Packages Computer Science

[Buy this book on publisher's site](#)

[Reprints and Permissions](#)

An approach to solve inventive problems based on the Substance - Field Analysis and System Dynamics

12th International Conference on Modeling, Optimization and SIMulation - MOSIM'18
June 27-29, 2018 – Toulouse, France
“The rise of connected systems in industry and services”

AN APPROACH TO SOLVE INVENTIVE PROBLEMS BASED ON THE SUBSTANCE-FIELD ANALYSIS AND SYSTEMS DYNAMICS

Delgado-Maciel J. AUTHOR, Cortés-Robles G. CO-AUTHOR

Tecnológico Nacional de México - Instituto
Tecnológico de Orizaba Avenida Oriente 9 No. 852 Col.
Emiliano Zapata C.P. 94320 Orizaba, Veracruz
jdelgadom@ito-depi.edu.mx, gcortes@ito-depi.edu.mx

Negny S. CO-AUTHOR

Institut National Polytechnique de Toulouse
CNRS UMR 5503, PSI/Génie Industriel – INPT –
ENSIACET, 118 Route de Narbonne, 31077 Toulouse
Cedex 04 – France
Stephane.Negny@ensiacet.fr

Maldonado-Macias A. CO-AUTHOR

Department of Industrial Engineering and
Manufacturing – Institute of Engineering and
Technology – Autonomous University of Ciudad Juárez,
Avenida del Charro 450 Norte, Col. Partido Romero,
Ciudad Juárez, Chihuahua, Mexico
amaldona@uacj.mx

ABSTRACT: *The Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) has their foundations on the knowledge extracted from the evolution of technical systems, scientific knowledge, and an effort to capitalize knowledge from several domains. Despite the TRIZ capacity to solve inventive problems, it lacks from three competencies: (1) TRIZ does not have a tool to observe the causality among the most important variables within an inventive problem; (2) It cannot follow the transformation of a system through time; (3) TRIZ cannot unveil the hidden relationships among different conflicts in a system to determine the right problem to solve and the most promising solving path. Nevertheless, there is a technical approach to explore the behavior of a system that can deal with the TRIZ drawbacks: The System Dynamics (SD) Modeling and Simulation Framework. This article demonstrates the feasibility to combine both approaches to produce a different problem-solving tool that can deal with inventive problems, particularly with problems modeled through a set of functions. The TRIZ tool that best deals with such kind of problems is the Substance-Field Modeling (SFM) tool. Once the user proposes a model, the next tool to use is a set of solving strategies (known as 76 Standard Solutions). These strategies suffer an adaptation process to propose at least one solving path. The combination of SFM and the SD approach is illustrated through a case study to discuss the advantage and limitation of a different solving framework.*

KEYWORDS: *Inventive Problems Modeling, System Dynamics Simulation, TRIZ, Substance-Field Analysis*

Anexo C. Productos académicos: Capítulos de libro

System Dynamics Modeling and TRIZ: A Practical Approach for Inventive Problem Solving



[TRIZ – The Theory of Inventive Problem Solving](#) pp 237-260 | [Cite as](#)

System Dynamics Modeling and TRIZ: A Practical Approach for Inventive Problem Solving

Authors [Authors and affiliations](#)

Jesús Delgado-Maciel, Guillermo Cortes-Robles , Cuauhtémoc Sánchez-Ramírez, Giner Alor-Hernández,
Jorge García-Alcaraz, Stéphane Negny

Chapter
First Online: 26 July 2017

 2
Citations

 2
Readers

 647
Downloads

Copyright information

© Springer International Publishing AG 2017

About this chapter

Cite this chapter as:

Delgado-Maciel J., Cortes-Robles G., Sánchez-Ramírez C., Alor-Hernández G., García-Alcaraz J., Negny S. (2017) System Dynamics Modeling and TRIZ: A Practical Approach for Inventive Problem Solving. In: Cavallucci D. (eds) TRIZ – The Theory of Inventive Problem Solving. Springer, Cham

First Online
26 July 2017

DOI
https://doi.org/10.1007/978-3-319-56593-4_10

Publisher Name
Springer, Cham

Print ISBN
978-3-319-56592-7

Online ISBN
978-3-319-56593-4

eBook Packages
[Computer Science](#)

[Buy this book on publisher's site](#)

[Reprints and Permissions](#)

Integration of Design Thinking and TRIZ Theory to Assist a User in the Formulation of an Innovation Project



[Managing Innovation in Highly Restrictive Environments](#) pp 303-327 | [Cite as](#)

Integration of Design Thinking and TRIZ Theory to Assist a User in the Formulation of an Innovation Project

Authors [Authors and affiliations](#)

Hugo Domingo García-Manilla , Jesús Delgado-Maciel, Diego Tlapa-Mendoza, Yolanda Angélica Báez-López,
Leonardo Riverda-Cadavid

Chapter
First Online: 06 July 2018



Part of the [Management and Industrial Engineering](#) book series (MINEN)

Copyright information

© Springer International Publishing AG 2019

About this chapter



Check for updates

Cite this chapter as:

García-Manilla H.D., Delgado-Maciel J., Tlapa-Mendoza D., Báez-López Y.A., Riverda-Cadavid L. (2019) Integration of Design Thinking and TRIZ Theory to Assist a User in the Formulation of an Innovation Project. In: Cortés-Robles G., García-Alcaraz J., Alor-Hernández G. (eds) *Managing Innovation in Highly Restrictive Environments*. Management and Industrial Engineering. Springer, Cham

First Online
06 July 2018

DOI
https://doi.org/10.1007/978-3-319-93716-8_14

Publisher Name
Springer, Cham

Print ISBN
978-3-319-93715-1

Online ISBN
978-3-319-93716-8

eBook Packages
[Engineering](#)

[Buy this book on publisher's site](#)

[Reprints and Permissions](#)

Referencias documentales

1. Altshuller, G., [1973]. *Algorithm of Inventions*, Moskovskiy Rabochij, Moscow, 1973 (in Russian); TIC, Worcester, 1999 (in English)
2. Altshuller, G., [1984]. *Creativity as an Exact Science*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
3. Altshuller, G., [1986]. *To Find an Idea: Introduction to the Theory of Inventive Problem Solving*, first ed. Novosibirsk, Nauka, Russia.
4. Altshuller, G., [1997]. *40 Principles: TRIZ Keys to Technical Innovation*, extended ed. Worcester, Massachusetts.
5. Altshuller, G., [1999]. *The Innovation Algorithm: TRIZ, systematic innovation and technical creativity*. Technical Innovation Ctr; Worcester, Massachusetts
6. Altshuller, G., [2005]. *The Innovation Algorithm* (Technical Innovation Center Inc. Fourth printing).
7. Altshuller G., [2007]. *The Innovation Algorithm*. Worcester, Massachusetts: Technical Innovation Center.
8. Ash A, Hunt L, Mc Donald C et al., [2015]. *Boosting the productivity and profitability of northern Australian beef enterprises: Exploring innovation options using simulation modelling and systems analysis*. *Agricultural Systems*. 139: 50–65.
9. Asyraf M, Ishak M, Sapuan S, Yidris N., [2020]. *Conceptual design of creep testing rig for full-scale cross arm using TRIZ-Morphological chart-analytic network process technique*. *Journal of Materials Research and Technology*. 8(6): 5647-5658. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.09.033
10. Azab M et al., [2017] *Diazepam induced oxidative DNA damage in cultured human lymphocytes*. *Journal of King Saud University – Science*. 30(3): 412-416. doi: 10.1016/j.jksus.2017.03.002
11. Baumann L, Grant G, Anoopkumar S, Kavanagh J et al., [2014]. *Drowsiness and motor responses to consecutive daily doses of promethazine and loratadine*. *Clinical Neurophysiology*, 125(12):2390-2396. doi: 10.1016/j.clinph.2014.03.026
12. Blazsek S, Escribano A., [2015]. *Knowledge spillovers in US patents: A dynamic patent intensity model with secret common innovation factors*. *Journal of Econometrics*. 159(1): 14–32. doi:10.1016/j.jeconom.2010.04.004
13. Broatch A, Novella M, Gómez-Soriano J., [2017] *Impact of the injector design on the combustion noise of gasoline partially premixed combustion in a 2-stroke engine*. *Applied Thermal Engineering*. 119: 530-540. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.081
14. Bultey, A., Yan, W., Zanni, C., [2015]. *A Proposal of a Systematic and Consistent Substance-field Analysis*. *Procedia Engineering* 131:701-710. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.357
15. Carver, J., 11 April 2000. Dry marker and eraser system. US Patent 6,048,121.
16. Cathie W et al., [2017]. *Two-dimensional bismuth oxybromide coupled with molybdenum disulphide for enhanced dye degradation using low power energy-saving light bulb*. *Journal of Environmental Management*. 197: 63-69. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.03.027
17. Cavallucci, D., [1999]. *TRIZ: l'approche Altshullérienne de la créativité, Techniques de l'Ingénieur*, A 5 211.
18. Cedillo M, Sánchez C., [2008]. *Análisis dinámico de sistemas industriales*, Trillas, México.
19. Chan, J., 23 March 1993. Umbrella. US Patent 5,195, 550 A.
20. Chang Y, Chien Y, Yu K et al., [2016]. *Effect of TRIZ on the creativity of engineering students*. *Thinking Skills and Creativity*. 19: 112-122. doi: 10.1016/j.tsc.2015.10.003
21. Chen J, Huang S., [2011]. *Eco-Innovative Design of Product Service Systems by using the Substance-Field Analysis Method*. In: Hesselbach J., Herrmann C. (eds) *Functional Thinking for Value Creation* (pp. 63-68). Berlin, Heidelberg: Springer
22. Chena H, Wakelandb W, Yuc J., [2012]. *A two-stage technology foresight model with system dynamics simulation and its application in the Chinese ICT industry*. *Technological Forecasting and Social Change*. 79(7): 1254-1267. doi: 10.1016/j.techfore.2012.02.007

23. Chena H, Yub J, Wakelandb W., [2016]. *Generating technology development paths to the desired future through system dynamics modeling and simulation*. *Futures*. 81: 81-97. doi: 10.1016/j.futures.2016.01.002
24. Cheng Y, Jahau C., [2011]. *Accelerating preliminary eco-innovation design for products that integrates case-based reasoning and TRIZ method*. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10): 998-1006
25. Chiavenato I., [1989]. *Introducción a la Teoría General de la Administración*, Mc. Graw – Hill Interamericana de México: S.A. México.
26. Chunlong W, Youcheng Z, Pereira M, Peng Q, Tan R., [2020]. *Conceptual digital twin modeling based on an integrated five-dimensional framework and TRIZ function model*. *Journal of Manufacturing Systems*. In Press, Corrected Proff doi:10.1016/j.jmsy.2020.07.006
27. Cortés G, García J, Alor G., [2019]. *Managing Innovation in Highly Restrictive Environments*, Springer International Publishing.
28. Dash W, Desheng., [2010]. *Modeling technological innovation risks of an entrepreneurial team using system dynamics: An agent-based perspective*. *Technological Forecasting and Social Change*. 77(6): 857–869. doi:10.1016/j.techfore.2010.01.015
29. Dawid, H, et al., [2015]. *Product innovation incentives by an incumbent firm: A dynamic analysis*. *Journal of Economic Behavior & Organization*. 117: 411–438. doi:10.1016/j.jebo.2015.07.001
30. Delgado-Maciel, J, et al., [2018]. *A comparison between the Functional Analysis and the Causal-Loop Diagram to model inventive problems*. *Procedia CIRP* 70: 259–264
31. Delgado-Maciel, J., Cortés-Robles, G., Jiménez, E., Sánchez-Ramírez, C., García-Alcaraz, J. (2017). Application of the Systems Dynamics Approach to Model Inventive Problems. In Martínez, F., Urraca, R., Quintian, H., Corchado, E. (Eds.), *Conference LNCS on Hybrid Artificial Intelligent Systems (HAIS'2017)* (pp. 494-506). Logroño, Spain: Springer
32. Donado-Campos, J. M., Dormido-Canto, S. y Morilla-García, F., [2005]. *Fundamentos de la dinámica de sistemas y modelos de dinámica de sistemas en epidemiología*, Tesis de Master Universitario en Ingeniería en Sistemas, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España.
33. Ekmekci I, Koksall M., [2015]. *Triz Methodology and an Application Example for Product Development*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 195: 2689-2698. doi: 10.1016/j.sbspro.2015.06.481
34. Evren Sagduyu, Y. et al., [2003]. *Energy-efficient MAC in ad-hoc networks inspired by conflict resolution concepts*. 1(1): 65–86.
35. Fansong L, Zhoua Y, Liua D et al., [2017]. *Thermodynamic calculations and dynamics simulation on thermal-decomposition reaction of MoS2 and Mo2S3 under vacuum*. *Vacuum*. 139: 143-152. doi: 10.1016/j.vacuum.2017.03.005
36. Fey, V., and Rivin, C., [2005]. *Innovation on Demand: New Product Development Using TRIZ*. Cambridge University Press.
37. Fiorineschi L, Saverio F, Rissone P et al., [2015]. *A Comparison of Classical TRIZ and OTSM-TRIZ in Dealing with Complex Problems*. *Procedia Engineering*. 131: 86-94. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.350
38. Forrester, J., [1961]. *Industrial Dynamics*. *Harv. Bus. Rev.* 36, 37–66.
39. Fujii K, Yoshitakea M, Watanabeb H et al., [2017]. Hydrogen bonding in protic and aprotic amide mixtures: Low-frequency Raman spectroscopy, small-angle neutron scattering, and molecular dynamics simulations. *Journal of Molecular Liquids*. In Press, Accepted Manuscript — Note to users. doi: 10.1016/j.molliq.2017.05.017
40. Glosario de términos del Premio Nacional de Tecnología, [2021]. Obtenido del sitio de internet <http://www.fpnt.org.mx> el día 27 de septiembre de 2020
41. Gronauer B, Naehler H., [2016]. *TRIZ as an Amplifier for Corporate Creativity and Corporate Innovation Ability*. *Procedia CIRP*. 39: 185-190. doi: 10.1016/j.procir.2016.01.186
42. Grüneisen, P., [2015]. *Qualitative System Dynamics Cycle Network of the Innovation Process of Product Service Systems*. *Procedia CIRP*. 30: 120-125. doi:10.1016/j.procir.2015.02.189
43. Guseo, Renato, et al., [2015]. *Heterogeneity in diffusion of innovations modelling: A few fundamental types*. *Technological Forecasting and Social Change*. 90: 514–524. doi:10.1016/j.techfore.2014.02.023
44. Hatson, R., Pyla, P., [2019]. *Mental Models and Conceptual Design*. *The UX Book*. Mendeley

- Data, v2. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-19285-9>
45. Helfman, Y., Reich, Y., Greenberg, S., [2015]. Substance Field Analysis and Biological Functions. *Procedia Engineering* 131: 372-376.
 46. Ho W, Xin M., [2018]. *The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process*. *European Journal of Operational Research* 267(2), 399-414
 47. Hwang, D, Park, W., [2018]. *Design heuristics set for X: A design aid for assistive product concept generation*. *Design Studies* 58: 89-126
 48. Hussein, K, Ishak, M, Sapuan, S, Yidris, N., [2020] *Conceptual design of the cross-arm for the application in the transmission towers by using TRIZ–morphological chart–ANP methods*. *Journal of Materials Research and Technology*. 9(4): 9182-9188. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.05.129
 49. Imoh M. Ilevbare, Probert D, Phaal R., [2013]. *A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice*. *Technovation* 33(2–3): 30-37
 50. Jing Li et al., [2012]. *The evolution of rules for conflicts resolution in self-organizing teams*. *Expert Systems with Applications*. 39(1): 239–246. doi:10.1016/j.eswa.2011.07.014
 51. Juin-Ming et al., [2019]. Acceptance and resistance of telehealth: The perspective of dual-factor concepts in technology adoption. *International Journal of Information Management*. 49: 34-44, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.003
 52. Jung Y, Lewis C., [2011]. *Accelerating preliminary eco-innovation design for products that integrates case-based reasoning and TRIZ method*, *Journal of Cleaner Production*, 19(9-10), 998-1006.
 53. Kampf F, Uthermann W., 15 October 1952. Garden Umbrella. US Patent 2,661,752A
 54. Khaira A, Dwivedi R., [2018]. *A State of the Art Review of Analytical Hierarchy Process*. *Materialstoday: Proceedings* 5(2), 4029-4035
 55. Ko Y., [2017]. *Modeling a hybrid-compact design matrix for new product innovation*. *Computers & Industrial Engineering*. 107:345-359. doi: 10.1016/j.cie.2016.04.016
 56. Kreng V, Wang B., [2013]. *An innovation diffusion of successive generations by system dynamics — An empirical study of Nike Golf Company*. *Technological Forecasting and Social Change*. 80(1): 77–87. doi:10.1016/j.techfore.2012.08.002
 57. Kindström D. et al., [2013]. *Enabling service innovation: A dynamic capabilities approach*. 66(8): 1063–1073. doi:10.1016/j.jbusres.2012.03.003
 58. King S, Burgess T., [2006]. *Beyond critical success factors: A dynamic model of enterprise system innovation*. *International Journal of Information Management* 26(1): 59-69.
 59. Kuo-Pin Y., 03 April 2001. Umbrella skeleton made of composite material. US Patent 6,209,556 B1
 60. Kwon S, Motohashi K., [2017]. *How institutional arrangements in the National Innovation System affect industrial competitiveness: A study of Japan and the U.S. with multiagent simulation*. *Technological Forecasting and Social Change*. 115:221-235. doi: 10.1016/j.techfore.2016.10.005
 61. Lambertini, L., [2015]. *Quality improvement and process innovation in monopoly: A dynamic analysis*. *Operations Research Letters*. 43(4), 370–373. doi:10.1016/j.orl.2015.04.009
 62. Lee, J., [2010]. *Conflict resolution in multi-agent based Intelligent Environments*. *Building and Environment*. 45(3): 574–585. doi:10.1016/j.buildenv.2009.07.013
 63. Lee S, Han W, Park Y., [2015]. Measuring the functional dynamics of product-service system: A system dynamics approach. *Computers & Industrial Engineering*. 80: 159-170. doi: 10.1016/j.cie.2014.12.005
 64. Lin, Fan et al., [2014]. *Research on Multi-specialty Coordination, Multi-discipline and Multifunction Integration Oriented Modeling and Simulation Innovation Technology*. *Procedia Engineering*. 99: 82-93. doi:10.1016/j.proeng.2014.12.511
 65. Liu H, Qu H, Li Y., [2017]. An Analytical Framework for the Evolution of Innovation of Niches in Business Ecosystems based on TRIZ. *Procedia Engineering*. 174:37-44. doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.137
 66. Love J, Roper S, Vahter P., [2014]. *Dynamic complementarities in innovation strategies*. *Research Policy*, 43(10): 1774-1784.
 67. Lu C, Liua H, Taob J et al., [2017]. *A key stakeholder-based financial subsidy stimulation for Chinese EV industrialization: A system dynamics simulation*. *Technological Forecasting and*

- Social Change. 118: 1-14. doi: 10.1016/j.techfore.2017.01.022
68. MacDonald et al., 17 August 2010. Umbrella. US Patent 7,775,226 B2
69. Mansoor M, Mariun N, Izzri N., [2017]. *Innovating problem solving for sustainable green roofs: Potential usage of TRIZ – Theory of inventive problem solving*. Ecological Engineering. 90:209-211. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.11.036
70. Matuszak A., [2015]. *Dimensional Analysis can Improve Equations of the Model*. Procedia Engineering 108, 526-535
71. Martínez E., [2016]. *Dinámica de Sistemas con aplicaciones*, Facultad de ingeniería de la Universidad de Antofagasta. Apuntes de clase.
72. Martins André C.R., et al., [2009]. *An opinion dynamics model for the diffusion of innovations*. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 388(15–16): 3225–3232. doi:10.1016/j.physa.2009.04.007
73. Nazidizaji, S., Tome, A., Regateiro, F., [2015]. *Modelling Design Problems by Su-Field Method – Toward a Problem Solving Approach in Architectural Design Studio*. Procedia – Social and Behavioral Sciences 197, 2022-2031
74. Noor A, Sapuan S, Ishak M, Sultan M., [2018] *Conceptual design of automobile engine rubber mounting composite using TRIZ-Morphological chart-analytic network process technique*. Defence Technology 14(4): 268-277
75. OECD Indicators [2014]. Education at a glance: organisation for economic co-operation and development. Education at a Glance. <https://www.oecd.org/mexico/Mexico-EAG2014-Country-Note.pdf> Acesado el 06 Noviembre 2019.
76. Omer, J., [2015]. *A space-discretized mixed-integer linear model for air-conflict resolution with speed and heading maneuvers*. Computers & Operations Research. 58: 75–86. doi:10.1016/j.cor.2014.12.012
77. Orloff, M., [2010]. *Inventive Thinking through TRIZ: A Practical Guide*:Springer.
78. Pokojski, J., Oleksiński, K., Pruszyński, J., [2018]. *Knowledge based processes in the context of conceptual design*. Journal of Industrial Information Integration. 15: 219-238. doi: 10.1016/j.jii.2018.07.002
79. Pokhrel C et al., [2015]. *Adaptation of TRIZ contradiction matrix for solving problems in process engineering*. Chemical Engineering Research and Design. 103: 3–10. doi:10.1016/j.cherd.2015.10.012
80. Raymond, Wladimir, et al., [2015]. *Dynamic models of R & D, innovation and productivity: Panel data evidence for Dutch and French manufacturing*. European Economic Review. 78: 285–306. doi:10.1016/j.euroecorev.2015.06.002
81. Rena J, Lia C , Wangb H et al., [2017]. *A system dynamics simulation model of chemical supply chain transportation risk management systems*. Computers & Chemical Engineering. 89: 71-83. doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.02.019
82. Rendón, M., [2013]. *Análisis y evaluación dinámica de los procesos logísticos clave en una refinería de granos de sorgo y melaza*. Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Orizaba.
83. Reid G., 29 March 2011. Umbrella. US Patent 7,913,709 B2
84. Rolere S, Coulon J, Poncin F., [2017] *Influence of the curing temperature on the diffusion rate of the perfluorinated alkyl chains of a modified epoxy resin*. European Polymer Journal. 91: 61-69. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2017.03.053
85. Saaty T., [2014]. *The neural network process: Generalization of the AHP and ANP to the continuous case of neural firing*, first ed. Pittsburgh, Pennsylvania.
86. Salamatov, Y., [1999]. *TRIZ: the Right Solution at the Right Time: A Guide to Innovative Problem Solving*. Krasnoyarsk, Russia: Institute of Innovative Design.
87. Samara, Elpida et al., [2012]. *The impact of innovation policies on the performance of national innovation systems: A system dynamics analysis*. Technovation. 32(11):624–638. doi:10.1016/j.technovation.2012.06.002
88. Sánchez, M., [2012]. *Reporte de Instrumentación Industrial*. Tesis del programa en ingeniería electromecánica, Universidad de Tlaxco.
89. Santos F, Di Caprio D, Tavana M et al., [2017]. *Innovation dynamics and labor force restructuring with asymmetrically developed national innovation systems*. International Business Review. 26(1): 36-56. doi: 10.1016/j.ibusrev.2016.05.005

90. Sapone A et al., [2016]. *Perturbation of xenobiotic metabolism in Dreissena polymorpha model exposed in situ to surface water (Lake Trasimene) purified with various disinfectants*. Chemosphere. 144: 548-554. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.09.022
91. Savransky, S., [2000]. *Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
92. Self, J., [2019]. *Communication through design sketches: Implications for stakeholder interpretation during concept design*. Design Studies 63: 1-36
93. Shimomura, Y. et al., [2010]. *Method for supporting conflict resolution for efficient PSS development*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 59(1):191-194 doi:10.1016/j.cirp.2010.03.122
94. Spreafico C, Russo D., [2016]. *TRIZ Industrial Case Studies: A Critical Survey*. Procedia CIRP. 39: 51-56. doi: 10.1016/j.procir.2016.01.165
95. Steen I et al., [2017]. *Influence of serving temperature on flavour perception and release of Bourbon Caturra coffee*. Food Chemistry. 219: 61-68. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.09.113
96. Sterman J., [2000]. *Business Dynamics: System thinking and modeling for a complex world*, Mc Graw-Hill, United States. doi:10.1057/palgrave.jors.2601336
97. Stummer, Christian, et al., [2015]. *Innovation diffusion of repeat purchase products in a competitive market: An agent-based simulation approach*. European Journal of Operational Research. 245(1): 157-167. doi:10.1016/j.ejor.2015.03.008
98. Tan, J. Ma, F. Liu and Z. Wie., [2009]. *UXDs-driven conceptual design process model for contradiction solving using CAIs*, Computers in Industry, 60(8), 584-591.
99. Tawanda M, Kennedy D, Bennett J, Makombe G, Mapiye C., [2020]. *Application of system dynamics modelling in evaluating sustainability of low-input ruminant farming systems in Eastern Cape Province, South Africa*. Ecological Modelling. 438: 109294. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109294
100. Terninko J., [1997]. *Step-by-Step QFD: Customer-Driven Product Design*, second ed. Boca Raton, Florida.
101. Terninko J., Zusman A, Zotlin B., [1998]. *Systematic Innovation: An Introduction to TRIZ*, St. Lucie Press.
102. Timma L, Baris U, Blumberga A, Blumberga D., [2015]. *Outlining Innovation Diffusion Processes in Households Using System Dynamics. Case Study: Energy Efficiency Lighting*. Energy Procedia. 75: 2859-2864. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.574
103. Tiuc D, Draghici G., [2017]. *TRIZ Model Used for Complaint Management in the Automotive Product Development Process*. Procedia - Social and Behavioral Sciences. 221: 414-422. doi: 10.1016/j.sbspro.2016.05.131
104. Xue C, Xu Y., [2017]. *Influence Factor Analysis of Enterprise IT Innovation Capacity Based on System Dynamics*. Procedia Engineering. 174: 232-239. doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.125
105. Vigants E, Blumberga A, Timma L et al., [2016]. *The dynamics of technological substitution: the case of eco-innovation diffusion of surface cleaning products*. Cleaner Production. 132: 279-288. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.007
106. Walker N., 25 April 2000. Umbrella. US Patent 6,053,188 A
107. Walrave B, Raven R., [2016]. *Modelling the dynamics of technological innovation systems*. Research Policy. 45(9): 1833-1844. doi: 10.1016/j.respol.2016.05.011
108. Wang D, Zhang D, Zhang L., [2015]. *Introduction of TRIZ Theory for the Conflict-solving in the Building Energy and Environment Management System Innovation*. Procedia Engineering. 121:2232-2239. doi:10.1016/j.proeng.2015.09.201
109. Wang F, Yeh C, Chu T., [2017]. *Using the design for Six Sigma approach with TRIZ for new product development*. Computers & Industrial Engineering. 98: 522-530. doi: 10.1016/j.cie.2016.06.014
110. Wei F, Haizhong A, Huajiao L et al., [2017]. *Accessing on the sustainability of urban ecological-economic systems by means of a coupled emergy and system dynamics model: A case study of Beijing*. Energy Policy. 100: 326-337. doi: 10.1016/j.enpol.2016.09.044
111. Wessel W. Wits et al., [2011]. *TRIZ based interface conflict resolving strategies for modular product architectures*. Procedia Engineering. 9: 30-39. doi:10.1016/j.proeng.2011.03.098
112. Wilk P., 26 April 1994. Umbrella with rounded rib terminals. US Patent 5,305,771 A

113. Wook Y, Wook S., [2016]. *Market Dynamics and Innovation Management on Performance in SMEs: Multi-agent Simulation Approach*. Procedia Computer Science. 91: 707-714. doi: 10.1016/j.procs.2016.07.060
114. Wu C, Chang C, Chen C., 06 November 2001. Umbrella. US Patent 6,311,707 B1
115. Yan, W., Zanni-Merk C., Rousselot F., Cavalucci D., Collet P., [2013]. A New Method of Using Physical Effects in Su-field Analysis based on Ontology Reasoning. *Procedia Computer Science* 22: 30-39
116. Yoon J, Kim K [2012]. Trend Perceptor: A property–function based technology intelligence system for identifying technology trends from patents. *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 3, pp. 2927-2938
117. Yu G., 03 February 2009. Oval umbrella system. US Patent 7,484,516 B1
118. Yu S, Lai M, Chu C, et al., [2016]. *Integration of low-pressure hydrogen storage cylinder and automatic controller for carbon deposit removal in car engine*. *International Journal of Hydrogen Energy*. 41(46): 21795–21801. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.191
119. Zahra F, Rasovskab I, Dubois S et al., [2017]. *Reviewing the use of the theory of inventive problem solving (TRIZ) in green supply chain problems*. *Cleaner production*. 142(2): 2677-2692. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.008
120. Zheng Li, et al., [2014]. *Identifying patent conflicts: TRIZ-Led Patent Mapping*. *World Patent Information*. 39: 11–23. doi:10.1016/j.wpi.2014.07.002
121. Zhou, Helmut Yabar, et al., [2014]. *Exploring the potential of introducing technology innovation and regulations in the energy sector in China: a regional dynamic evaluation model*. *Journal of Cleaner Production*. 112: 1537–1548. doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.070
122. Zlotin B. y Zusman A., [1999]. *Managing Innovation Knowledge: The Ideation Approach to the Search, Development, and Utilization of Innovation Knowledge*, Ideation International.