



UNIVERSIDAD DE AYSÉN

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL INFORMÁTICA

Diseño de un Modelo de Simulación para el Análisis de Resiliencia en la Cadena de Suministro de Gas Licuado de Petróleo de Aysén

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Informático

Autor: Carlos Subiabre Saldivia

Mentora: Natacha Pino Acuña

Coyhaique, Chile

2025

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a las personas que hicieron posible la realización de esta memoria.

A mi familia, por su constante apoyo y paciencia a lo largo de mis años de estudio. Su confianza fue fundamental para llegar a esta etapa.

A mi mejor amiga, por su invaluable amistad y por su aliento en los momentos más difíciles de este proceso.

A mi mentora, Profesora Natacha Pino Acuña, por su guía, tiempo y dedicación. Sus conocimientos y consejos fueron esenciales para el desarrollo de esta memoria.

RESUMEN

La cadena de suministro de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en la Región de Aysén constituye un sistema sociotécnico de alta criticidad, caracterizado por una topología logística sin redundancia y una capacidad de respuesta endógena insuficiente para mitigar las disrupciones exógenas recurrentes. El diagnóstico técnico actual, si bien es exhaustivo, es de naturaleza estática y carece de herramientas para evaluar dinámicamente el impacto de los riesgos o el retorno en resiliencia de las inversiones propuestas.

Este trabajo de titulación aborda dicha brecha metodológica mediante el diseño, implementación y validación de un prototipo de simulación de eventos discretos. El artefacto computacional desarrollado modela la interacción de los parámetros logísticos clave —capacidad de almacenamiento, políticas de inventario, demanda estocástica y, crucialmente, la frecuencia y duración de las interrupciones de la ruta de suministro— concentrados en el nodo de almacenamiento primario de Coyhaique, que actúa como centro neurálgico del sistema regional.

El objetivo es crear un laboratorio virtual que permita cuantificar la resiliencia del sistema bajo diferentes escenarios. Mediante un diseño de experimentos formal, se evaluará la sensibilidad del sistema a distintos parámetros, buscando confirmar la hipótesis de que la resiliencia es significativamente más sensible a la duración de las disrupciones de ruta que a las variaciones en la capacidad de almacenamiento. El prototipo validado sienta una base metodológica para la toma de decisiones informadas, instrumentalizando una recomendación explícita de la política pública regional y contribuyendo al fortalecimiento de la seguridad energética de Aysén.

Palabras Clave: Simulación de Eventos Discretos, Resiliencia de Cadenas de Suministro, Gestión de Inventarios, Análisis de Riesgos, Seguridad Energética, Ingeniería de

Sistemas.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice general	IV
Índice de figuras	V
Índice de cuadros	VI
1 Introducción	1
1.1. Contexto General de la Logística Energética en Zonas Extremas	1
1.2. Caracterización Geográfica y Energética de la Región de Aysén	2
1.3. Infraestructura y Operación Logística Actual	3
1.4. Definición y Mecánica del Problema	4
1.5. Insuficiencia de las Herramientas de Diagnóstico Actuales	5
1.6. Levantamiento de Requerimientos del Sistema de Simulación	5
2 Objetivos del Proyecto	7
2.1. Justificación Técnica	7
2.2. Objetivo General	7
2.3. Objetivos Específicos	7
3 Marco Conceptual y Matemático	9
3.1. Teoría de Simulación de Eventos Discretos (DES)	9
3.2. Algoritmos Computacionales del Motor	10
3.3. Teoría de Generación de Números Pseudoaleatorios	11

3.4.	Modelado Probabilístico de Procesos Logísticos	11
3.5.	Gestión de Inventarios: La Lógica (Q, R)	12
3.6.	Validación y Verificación (VV)	13
4	Modelado de Componentes del Sistema	14
4.1.	Modelo del Hub de Almacenamiento	14
4.2.	Caracterización Estocástica de la Demanda	15
4.3.	Modelo de la Ruta Logística	16
5	Diseño e Implementación de la Solución	17
5.1.	Fundamentación del Stack Tecnológico	17
5.2.	Arquitectura de Procesos y Corutinas	17
5.3.	Complejidad Computacional	18
5.4.	Aseguramiento de Calidad (QA)	18
6	Resultados del Experimento Computacional	20
6.1.	Análisis del Escenario Base (Status Quo)	20
6.2.	Análisis de Sensibilidad Paramétrica	21
6.3.	Conclusión del Análisis	21

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto General de la Logística Energética en Zonas Extremas

La seguridad energética, tradicionalmente analizada desde la perspectiva de la generación y transmisión en grandes redes interconectadas, adquiere una dimensión radicalmente distinta cuando se aborda desde la óptica de territorios geográficamente aislados. En estas zonas, denominadas en la literatura especializada como "islas energéticas", el suministro no es un flujo continuo garantizado por la infraestructura física de un ducto o un cable, sino el resultado de una operación logística compleja, discreta y vulnerable.

El desafío de la "última milla" en climas extremos no es trivial. Requiere la coordinación precisa de cadenas de suministro multimodales que deben operar bajo condiciones meteorológicas adversas, atravesar topografías accidentadas y, a menudo, cruzar fronteras internacionales. En este contexto, la energía se mercantiliza y se transporta como cualquier otro bien físico, lo que la somete a las mismas leyes de inventario, transporte y quiebre de stock que afectan a los bienes de consumo, pero con una diferencia fundamental: la criticidad social del recurso. La interrupción del suministro energético en una zona aislada no genera meramente una pérdida económica o una incomodidad; en climas subpolares o de invierno riguroso, la falta de combustible compromete directamente la habitabilidad de las viviendas, la operatividad de los servicios sanitarios y, en última instancia, la seguridad vital de la población.

Por consiguiente, el análisis de estos sistemas no puede limitarse a la evaluación de

capacidades estáticas. Exige una comprensión profunda de la dinámica temporal de la logística, la variabilidad estocástica de la demanda térmica y la confiabilidad probabilística de las rutas de acceso. La resiliencia, definida como la capacidad del sistema para absorber perturbaciones exógenas sin colapsar, se convierte así en el parámetro de diseño más relevante, superando incluso a la eficiencia de costos en la jerarquía de objetivos estratégicos.

1.2. Caracterización Geográfica y Energética de la Región de Aysén

La Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, situada en la Patagonia occidental chilena, constituye un laboratorio natural para el estudio de la vulnerabilidad logística extrema. Su geografía, fragmentada por una intrincada red de fiordos, canales, cordilleras y campos de hielo, ha impuesto históricamente una barrera formidable a la integración física con el resto del territorio nacional. A diferencia de las regiones del centro y norte de Chile, que se benefician de una conectividad robusta a través de la Ruta 5 Panamericana y el Sistema Eléctrico Nacional, Aysén opera en una condición de semi-autarquía logística.

Desde el punto de vista de la matriz energética, la región presenta una dependencia estructural de combustibles fósiles importados. La ausencia de yacimientos locales de hidrocarburos y la inviabilidad técnica y económica de extender gasoductos desde la zona central o desde la Región de Magallanes obligan a importar la totalidad de la demanda de combustibles. En este escenario, el Gas Licuado de Petróleo (GLP) ha emergido como el vector energético predominante para el sector residencial y comercial. Su elección no es casual: el GLP ofrece una alta densidad energética y facilidad de almacenamiento en tanques locales, características ideales para la calefacción descentralizada en zonas donde la red eléctrica es costosa o inestable y donde la leña enfrenta crecientes restricciones ambientales por contaminación atmosférica.

Sin embargo, esta dependencia del GLP implica una servidumbre logística. El combustible debe ser transportado físicamente desde los centros de refinación y fracciona-

miento, ubicados a miles de kilómetros de distancia. La cadena de suministro actual se configura como un sistema lineal y rígido, sin redundancias significativas. El abastecimiento proviene mayoritariamente de dos fuentes: la planta de Cabo Negro en la Región de Magallanes (Chile) o las plantas de la provincia de Neuquén (Argentina).

1.3. Infraestructura y Operación Logística Actual

La columna vertebral de este sistema de abastecimiento es la red vial, específicamente la Ruta 7 y sus conexiones internacionales. Para que un camión cisterna cargado con GLP llegue a los tanques de almacenamiento en la capital regional, Coyhaique, debe realizar una travesía de aproximadamente 1.400 kilómetros. Un aspecto crítico de esta operación es su dependencia geopolítica: debido a la discontinuidad territorial de Chile en la zona austral, cerca del 86

Esta configuración impone una serie de restricciones y riesgos operativos. Los vehículos deben someterse a controles aduaneros en pasos fronterizos como Huemules o Integración Austral, procesos que añaden variabilidad a los tiempos de ciclo. Además, la operación queda expuesta a las condiciones de mantenimiento de la vialidad extranjera y a la situación social y política del país vecino.

Al arribar al nodo de consumo en Coyhaique, el combustible se descarga en la infraestructura de almacenamiento local. Este nodo está compuesto por las plantas de tres empresas distribuidoras privadas: Abastible, Lipigas y Gasco. Según el catastro de infraestructura crítica regional [1], la capacidad nominal combinada de estos tres actores asciende a 431 toneladas métricas. Esta cifra representa el "pulmón" del sistema: la máxima cantidad de energía que la región puede acumular para enfrentar periodos de aislamiento.

Para dimensionar la precariedad de esta cifra, es necesario contrastarla con la demanda real. Durante los meses de invierno (junio a agosto), las bajas temperaturas disparan el consumo de calefacción. Las estimaciones técnicas sitúan la demanda promedio diaria en 52,5 toneladas. Una operación aritmética simple revela la fragilidad

del sistema:

$$\text{Autonomía Teórica} = \frac{431 \text{ ton}}{52,5 \text{ ton/día}} \approx 8,2 \text{ días}$$

Esta autonomía de apenas una semana implica que el sistema opera bajo una lógica de "justo a tiempo" (*Just-in-Time*) forzoso, una estrategia eficiente en manufactura pero peligrosa en seguridad energética crítica.

1.4. Definición y Mecánica del Problema

El problema de investigación no radica en la capacidad de almacenamiento per se, sino en la asimetría entre esta capacidad de resistencia y la magnitud de las amenazas que enfrenta la cadena de suministro. El sistema está diseñado para operar en condiciones normales, pero carece de holgura para absorber eventos disruptivos de mediana o gran magnitud.

La amenaza principal es la interrupción del flujo en la Ruta 7. Estas interrupciones no son eventos teóricos improbables; son realidades recurrentes documentadas. En invierno, las tormentas de nieve en los pasos cordilleranos, especialmente en el sector de Huemules (situado a mayor altura), pueden bloquear el tránsito de vehículos pesados por periodos que varían desde un par de días hasta semanas completas. Adicionalmente, la dependencia del tránsito por Argentina introduce riesgos de naturaleza social, como paros de camioneros o bloqueos de ruta por protestas gremiales.

Los datos históricos son elocuentes. El informe del CIEP [1] documenta que la región ha enfrentado contingencias logísticas que han mantenido la ruta cerrada por hasta 21 días consecutivos. Al superponer este dato (21 días de bloqueo potencial) con la capacidad del sistema (8 días de autonomía), se hace evidente una brecha de seguridad insalvable de 13 días. En un escenario de este tipo, el agotamiento del stock no es una posibilidad, es una certeza matemática.

La mecánica del colapso es progresiva pero implacable. Ante un corte de ruta, el inventario en los tanques comienza a descender linealmente impulsado por el consumo diario. Si la ruta no se despeja antes del día 8, los tanques llegan a su nivel mínimo técnico. En ese punto, la presión en las redes de distribución cae, las empresas deben

racionar la entrega y, finalmente, el servicio se interrumpe totalmente. Este "apagón de gas" deja a hogares, escuelas y centros de salud sin su fuente primaria de calor en el momento climático más adverso del año.

1.5. Insuficiencia de las Herramientas de Diagnóstico

Actuales

Pese a la gravedad evidente de esta vulnerabilidad, la planificación energética regional carece de herramientas modernas para cuantificar y gestionar este riesgo. Las metodologías empleadas actualmente por la autoridad y las empresas se basan predominantemente en el juicio experto y en herramientas estáticas, como las matrices de riesgo.

Una matriz de riesgo es un instrumento cualitativo que permite catalogar amenazas en cuadrantes de "Probabilidad" e "Impacto". Si bien es útil para jerarquizar problemas, es ciega a la dinámica temporal. Una matriz puede indicar que el riesgo de corte de ruta es "Alto", pero no puede responder preguntas operativas críticas: ¿Cuál es la probabilidad exacta de un quiebre de stock si la demanda aumenta un 5

La falta de modelos cuantitativos dinámicos obliga a tomar decisiones de inversión a ciegas o basadas en intuiciones. La propuesta de ampliar la capacidad de almacenamiento, por ejemplo, se evalúa a menudo mediante costos unitarios de construcción, sin tener una métrica clara de cuánto aumenta realmente la seguridad del suministro por cada tonelada adicional de capacidad instalada. Existe, por tanto, una necesidad urgente de tecnificar el análisis, transitando desde la descripción cualitativa del riesgo hacia la simulación computacional del desempeño logístico.

1.6. Levantamiento de Requerimientos del Sistema de Simulación

Este proyecto de tesis se plantea como respuesta directa a esta carencia metodológica. El objetivo es diseñar y construir un artefacto de software —un simulador de

eventos discretos— que actúe como un "gemelo digital" simplificado del sistema de abastecimiento de Aysén.

Para que esta herramienta sea efectiva y constituya un aporte real a la ingeniería regional, debe satisfacer un conjunto de requerimientos funcionales y no funcionales rigurosos:

1. ****Fidelidad Física del Inventario:**** El modelo debe implementar un balance de masas estricto. Debe contabilizar cada kilogramo de gas que entra y sale del sistema, respetando las restricciones físicas de capacidad máxima de los tanques y la imposibilidad de tener inventarios negativos.
2. ****Modelado Estocástico de Variables:**** El software debe abandonar el uso de promedios simples. Debe integrar algoritmos de generación de números pseudoaleatorios para replicar la variabilidad natural de la demanda (que fluctúa día a día) y la naturaleza probabilística de los eventos de falla en la ruta.
3. ****Parametrización Flexible:**** La herramienta no debe ser un modelo rígido de la situación actual ("hard-coded"), sino una plataforma de experimentación. Debe permitir al usuario configurar fácilmente distintos escenarios, modificando variables como el tamaño de los tanques, la flota de camiones o las estadísticas de clima, para realizar análisis de sensibilidad "what-if".
4. ****Generación de Métricas de Negocio:**** Finalmente, el simulador debe procesar los datos crudos de la operación diaria para calcular indicadores agregados de alto nivel que apoyen la toma de decisiones. Específicamente, debe cuantificar el Nivel de Servicio (porcentaje de la demanda anual satisfecha) y la magnitud temporal de los fallos (días/año sin suministro), métricas que traducen la complejidad técnica en impacto social comprensible.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1. Justificación Técnica

El problema de abastecimiento en Aysén presenta características intrínsecas de concurrencia y variabilidad estocástica que dificultan su análisis mediante métodos deterministas. Las herramientas de cálculo estático tradicionales no permiten modelar adecuadamente la interacción temporal compleja entre un consumo variable, un transporte sujeto a retardos y las interrupciones aleatorias de la infraestructura vial. Por consiguiente, se requiere el desarrollo de una solución basada en el paradigma de Simulación de Eventos Discretos (DES), la cual permite representar los estados del sistema y evaluar su desempeño bajo condiciones de incertidumbre.

2.2. Objetivo General

Diseñar e implementar un simulador de eventos discretos para cuantificar el desempeño logístico y la resiliencia de la cadena de suministro de GLP en la Región de Aysén, evaluando el impacto de diferentes escenarios de infraestructura y gestión operativa.

2.3. Objetivos Específicos

El proyecto se estructura en torno a tres metas operativas secuenciales:

1. Formalización del Modelo

Definir con precisión las reglas lógicas y los parámetros cuantitativos que rigen el comportamiento del sistema real.

- Identificar y caracterizar las entidades del sistema (tanques de almacenamiento, flota de camiones) y sus atributos de estado.
- Establecer las distribuciones de probabilidad teóricas que mejor ajustan el comportamiento de la demanda y las fallas de ruta.
- Definir el algoritmo de decisión para la gestión del reabastecimiento de inventario.

2. Construcción del Software

Traducir el modelo conceptual a un artefacto de software funcional.

- Programar el motor de simulación utilizando librerías especializadas en eventos discretos.
- Implementar los módulos de generación de números aleatorios y control de transición de estados.
- Verificar la corrección lógica del código mediante la ejecución de pruebas unitarias exhaustivas.

3. Ejecución Experimental

Generar datos sintéticos para el análisis de desempeño del sistema.

- Configurar escenarios de prueba controlados, variando parámetros críticos como la capacidad de almacenamiento y la duración de los cortes.
- Ejecutar simulaciones masivas mediante el método de Monte Carlo para obtener resultados estadísticamente significativos.
- Calcular y analizar los indicadores de Nivel de Servicio resultantes para cada escenario evaluado.

CAPÍTULO 3

MARCO CONCEPTUAL Y MATEMÁTICO

La construcción de un simulador para sistemas logísticos complejos no es un ejercicio trivial de programación, sino una aplicación sistemática de principios de la teoría de la computación, la estadística matemática y la investigación de operaciones. Este capítulo establece los fundamentos formales que validan la arquitectura del software, detallando los algoritmos específicos seleccionados para la gestión del tiempo discreto, la generación de entropía artificial y la modelación de procesos estocásticos.

3.1. Teoría de Simulación de Eventos Discretos (DES)

La Simulación de Eventos Discretos se distingue fundamentalmente de la simulación continua por su tratamiento del tiempo y del estado del sistema.

Definición Formal del Sistema

Según **Banks2010**, un sistema de eventos discretos se modela mediante una tupla de variables de estado $S(t)$ cuya trayectoria es constante a tramos (*piecewise constant*). Matemáticamente, si definimos una secuencia de eventos e_1, e_2, \dots, e_n que ocurren en los tiempos $t_1 < t_2 < \dots < t_n$, el estado del sistema permanece inmutable en el intervalo $[t_i, t_{i+1})$. Esta propiedad es la que permite al algoritmo de simulación “saltar” en el tiempo, avanzando el reloj global (*CLOCK*) directamente de t_i a t_{i+1} sin incurrir en el costo computacional de integrar los pasos intermedios [**Law2015**].

Mecanismo de Avance de Tiempo

El motor de simulación implementa el mecanismo de *Next-Event Time Advance*. A diferencia de los enfoques de incremento fijo (Δt), este algoritmo garantiza que el reloj de simulación se actualice exactamente al instante en que ocurre el cambio de estado más próximo, eliminando errores de discretización temporal y optimizando el uso de ciclos de CPU durante periodos de inactividad del sistema.

3.2. Algoritmos Computacionales del Motor

La eficiencia del simulador reside en su capacidad para gestionar la Lista de Eventos Futuros (FEL, por sus siglas en inglés). Esta lista es una estructura de datos dinámica que actúa como el planificador central del sistema.

Estructura de Datos: Montículo Binario

Dado que el motor debe recuperar repetidamente el evento con el tiempo mínimo (t_{min}) para avanzar el reloj, la elección de la estructura de datos es crítica para la complejidad asintótica del software. Una lista lineal no ordenada implicaría un costo de búsqueda de $O(n)$, lo cual es prohibitivo para simulaciones de larga duración.

Para este proyecto, se utiliza una estructura de cola de prioridad implementada como un *Min-Heap* binario. Según **Knuth1997**, esta estructura garantiza que el elemento de menor valor (el próximo evento) siempre se encuentre en la raíz del árbol.

Complejidad Algorítmica

El uso de un montículo binario permite realizar las operaciones críticas con alta eficiencia:

- **Extracción del Mínimo:** La recuperación del próximo evento tiene un costo de $O(1)$, mientras que la reestructuración del árbol tras la eliminación es $O(\log n)$.
- **Inserción de Eventos:** La programación de nuevos eventos futuros se realiza con una complejidad de $O(\log n)$.

Esto asegura que el simulador mantenga su rendimiento incluso cuando el número de eventos pendientes crece considerablemente, permitiendo la ejecución de 100.000 iteraciones en tiempos razonables.

3.3. Teoría de Generación de Números Pseudoaleatorios

La simulación estocástica depende de la capacidad del computador para generar secuencias numéricas que emulen el azar con propiedades estadísticas rigurosas.

Algoritmo Mersenne Twister

El núcleo generador seleccionado para este estudio es el **Mersenne Twister** (MT19937), desarrollado por **Matsumoto1998**. Este algoritmo se basa en una recurrencia lineal matricial sobre un cuerpo finito binario F_2 .

La elección de este generador específico se justifica por dos propiedades fundamentales:

1. **Periodo Colosal:** Tiene un periodo de $2^{19937} - 1$. Como explica **Knuth1997**, un periodo largo es esencial para evitar que la simulación entre en ciclos repetitivos que invaliden los resultados estadísticos en experimentos masivos.
2. **Equidistribución k-dimensional:** El MT19937 posee la propiedad de k-distribución para $k = 623$, lo que significa que la secuencia de números es estadísticamente equidistribuida en 623 dimensiones, asegurando una “calidad” de aleatoriedad muy superior a los generadores congruenciales lineales.

3.4. Modelado Probabilístico de Procesos Logísticos

Para representar los fenómenos físicos del mundo real dentro del computador, se utilizan distribuciones de probabilidad teóricas que capturan la naturaleza de cada proceso.

Procesos de Llegada de Fallas

La ocurrencia de fallas en la ruta se modela como un Proceso de Poisson. La justificación teórica radica en la independencia de los eventos de falla. Según **Ross2014**, si el número de eventos en un intervalo sigue una distribución de Poisson, los tiempos entre eventos consecutivos siguen una distribución Exponencial.

Propiedad de Falta de Memoria

La distribución Exponencial es única por poseer la propiedad de *falta de memoria* (memorylessness):

$$P(X > s + t \mid X > s) = P(X > t) \quad (3.1)$$

Esta propiedad interpreta correctamente la realidad física de la ruta: el hecho de que no haya habido un derrumbe en los últimos 10 días no aumenta la probabilidad condicional de que ocurra uno mañana; el riesgo es constante e independiente de la historia acumulada.

3.5. Gestión de Inventarios: La Lógica (Q, R)

Finalmente, el comportamiento “inteligente” del sistema logístico se modela utilizando la Teoría de Inventarios. Se implementa una política de revisión continua (Q, R) [**Silver2017**].

Punto de Reorden (R)

El parámetro R define el nivel de inventario que gatilla una reposición. Se calcula teóricamente para cubrir la demanda esperada durante el tiempo de entrega (*lead time*) más un stock de seguridad que amortigua la variabilidad de la demanda y del propio tiempo de entrega.

Cantidad de Pedido (Q)

El parámetro Q define el tamaño del lote de reposición. En este modelo, Q representa la capacidad de transporte agregada o el lote económico de compra, y determina la magnitud del incremento de inventario cuando llega un pedido.

3.6. Validación y Verificación (VV)

Para asegurar la fiabilidad del artefacto de software, se sigue el marco de validación propuesto por **Sargent2013**. La **Verificación** se enfoca en la corrección del código (“¿Construimos el modelo correctamente?”), asegurando que la implementación en Python corresponda a la lógica matemática descrita. La **Validación**, por su parte, se enfoca en la precisión del modelo (“¿Construimos el modelo correcto?”), comparando las salidas de la simulación con el comportamiento esperado del sistema real.

CAPÍTULO 4

MODELADO DE COMPONENTES DEL SISTEMA

La traducción de la realidad operativa de Aysén a un modelo computacional requiere la definición formal de las entidades y sus interacciones. Este capítulo detalla la parametrización de los componentes basándose en los datos técnicos recolectados por el Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) [1] y justifica las decisiones de modelado estadístico.

4.1. Modelo del Hub de Almacenamiento

El nodo de Coyhaique actúa como el corazón del sistema logístico. En la simulación, este nodo no se representa como un simple número, sino como un sistema dinámico de inventario con restricciones físicas estrictas.

Capacidad y Restricciones Físicas

La infraestructura de almacenamiento se modela como un recurso compartido de capacidad finita. Basado en el catastro de infraestructura regional, se establece una capacidad nominal combinada (K) de 431 toneladas métricas. Esta variable impone una restricción no lineal en el modelo: el nivel de inventario $I(t)$ está acotado en el intervalo $[0, K]$.

Esta restricción tiene implicancias operativas críticas que el simulador debe capturar:

1. **Saturación Superior:** Si en un instante t , el nivel $I(t)$ alcanza el límite superior K , el sistema entra en un estado de saturación. Cualquier flujo de entrada adicional

se bloquea, lo que en la realidad física equivaldría a que un camión deba esperar en el patio de carga sin poder descargar.

2. **Agotamiento Inferior:** Por el contrario, si $I(t)$ llega a cero, el sistema entra en falla y el flujo de salida se interrumpe forzosamente, lo que genera el evento de “Demanda Insatisfecha”.

Dinámica de Flujos

El estado del inventario evoluciona según la ecuación de balance de masa en tiempo discreto:

$$I(t) = I(t - 1) + Entradas(t) - Salidas(t) \quad (4.1)$$

Esta ecuación simple es la base de la integridad del modelo, asegurando que no se cree ni se destruya materia, sino que solo se transforme.

4.2. Caracterización Estocástica de la Demanda

La demanda de combustible es la fuerza motriz que vacía el inventario. Para someter al sistema a una prueba de estrés realista, el modelo se parametrizó utilizando el perfil de consumo invernal, el periodo más exigente del año.

Parámetros de Consumo

Según los registros del Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) [1], el consumo base promedio en invierno es de 52,5 toneladas diarias. Sin embargo, modelar la demanda como una constante sería un error metodológico grave, ya que ignoraría los picos de consumo provocados por olas de frío.

Justificación de la Distribución Normal

Para capturar la variabilidad diaria, se aplicó el Teorema del Límite Central. Dado que la demanda total de la ciudad es la suma de miles de decisiones de consumo individuales e independientes (cada hogar encendiendo su estufa), su comportamiento

agregado tiende asintóticamente a una distribución Normal. Por ello, el simulador modela la demanda diaria D_t como una variable aleatoria $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$, con una media de 52,5 y una desviación estándar que representa una variabilidad del 15

4.3. Modelo de la Ruta Logística

La Ruta 7 es el componente que conecta la fuente de suministro con el nodo de consumo. En el modelo, esta ruta no es solo una distancia, sino un proceso dinámico sujeto a fallas estocásticas.

Tiempos de Tránsito y Latencia

En condiciones ideales, el tiempo de ciclo de un camión (carga, viaje, aduana y descarga) es de 6 días. Este parámetro define la latencia base del sistema de retroalimentación. Cualquier decisión de pedido tomada en t solo tendrá efecto en el inventario en $t + 6$.

Generación de Disrupciones

Basado en la historia de eventos reportada por Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) [1], el simulador utiliza un generador de eventos para inyectar fallas en el sistema.

- **Frecuencia:** Se utiliza un proceso de Poisson con tasa $\lambda = 4$ eventos/año para determinar cuándo ocurre un corte.
- **Duración:** Se utiliza una distribución Triangular (Mín: 3, Moda: 7, Máx: 21 días) para determinar cuánto tiempo permanece cerrada la ruta.

Esta configuración permite al simulador explorar todo el espectro de riesgos posibles, desde cortes breves hasta interrupciones catastróficas.

CAPÍTULO 5

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN

La implementación del modelo matemático se realizó construyendo un artefacto de software en Python. Este capítulo detalla la arquitectura computacional, justificando las decisiones de diseño en función de la eficiencia algorítmica y la mantenibilidad del código.

5.1. Fundamentación del Stack Tecnológico

El núcleo del simulador fue construido sobre el ecosistema de *Scientific Python*, una elección respaldada por la literatura técnica como el estándar moderno para la computación científica [2]. Se seleccionaron librerías específicas para optimizar el rendimiento y la precisión:

- **SimPy**: Framework de simulación de eventos discretos basado en generadores. A diferencia de los simuladores basados en *callbacks*, SimPy permite modelar procesos activos de manera intuitiva.
- **NumPy**: Motor de cálculo numérico optimizado en C, utilizado para la generación eficiente de variables aleatorias de alta calidad estadística.

5.2. Arquitectura de Procesos y Corutinas

Uno de los desafíos centrales en la simulación de sistemas complejos es la gestión de la concurrencia. El sistema real posee múltiples actores (consumidores, camiones, clima) que operan simultáneamente. Para modelar esto en un entorno de ejecución de un solo hilo (*single-threaded*), se utilizó el patrón de diseño de corutinas.

Mediante la palabra clave `yield` de Python, las funciones del simulador pueden pausar su ejecución y ceder el control al planificador central de eventos [SimPyDoc]. Esto permite modelar procesos concurrentes utilizando concurrencia cooperativa, eliminando la sobrecarga (*overhead*) de cambios de contexto asociados al multihilo tradicional del sistema operativo.

Algoritmo de Sincronización

El proceso de reabastecimiento, por ejemplo, no es un bucle infinito que consume CPU (espera activa), sino un generador que interactúa con el reloj de simulación. El proceso evalúa la condición de inventario y, si el nivel es suficiente, invoca `yield timeout(1)`, instruyendo al simulador a "dormir" este proceso hasta el siguiente día lógico. Esta técnica optimiza drásticamente el uso de recursos computacionales.

5.3. Complejidad Computacional

El rendimiento del simulador está determinado teóricamente por la eficiencia de las operaciones en la Lista de Eventos Futuros (FEL). Dado que SimPy implementa esta lista mediante un montículo binario (*min-heap*), el costo de procesar una simulación de N eventos es de orden $O(N \log M)$, donde M es el número promedio de eventos pendientes en la cola.

En el contexto de este proyecto, el número de eventos concurrentes se mantiene acotado (proporcional al número de camiones en tránsito), lo que garantiza que el tiempo de ejecución crezca de manera casi lineal con la duración de la simulación. Esta eficiencia algorítmica es la propiedad fundamental que viabiliza la ejecución del experimento de Monte Carlo con 100.000 iteraciones en tiempos de cómputo reducidos.

5.4. Aseguramiento de Calidad (QA)

Siguiendo las prácticas de ingeniería de software modernas, se implementó una estrategia de validación basada en pruebas automatizadas. Se verificaron los invariantes

físicos del sistema mediante aserciones lógicas. Específicamente, se comprueba la ley de conservación de masa:

$$\sum \text{Entradas} - \sum \text{Salidas} = \Delta \text{Inventario} \quad (5.1)$$

La validación estricta de esta igualdad al final de cada ejecución asegura que no existen errores de lógica en la manipulación de las variables de estado compartidas, garantizando la integridad de los datos generados.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS DEL EXPERIMENTO COMPUTACIONAL

Este capítulo presenta los datos obtenidos tras la ejecución masiva del simulador. Se analiza el comportamiento del sistema a partir de los datos sintéticos generados en un experimento de Monte Carlo compuesto por 100.000 iteraciones independientes.

6.1. Análisis del Escenario Base (Status Quo)

La primera fase del experimento evaluó la configuración actual de infraestructura ($K = 431$ toneladas). El análisis de las series de tiempo generadas revela un comportamiento bimodal en el sistema.

Modo de Operación Nominal

En las iteraciones donde la variable aleatoria de corte de ruta tomó valores bajos ($T_{corte} \leq 7$ días), el sistema mantuvo la estabilidad. El algoritmo de reabastecimiento logró compensar el consumo diario, manteniendo el nivel del tanque oscilando dentro de la banda de seguridad. El Nivel de Servicio promedio registrado fue de 99,2 %, con una varianza mínima.

Modo de Falla Catastrófica

Cuando el generador estocástico introdujo eventos de larga duración ($T_{corte} \approx 21$ días), se observó un desacople del sistema. La tasa de consumo (≈ 52 ton/día) agotó el inventario integral ($I(t) = 0$) antes de que la ruta fuera liberada. Matemáticamente,

el tiempo de recuperación del inventario se volvió asintótico, resultando en un periodo medio de 8 días de demanda insatisfecha no recuperable.

6.2. Análisis de Sensibilidad Paramétrica

Para cuantificar la elasticidad del sistema ante cambios en sus variables de diseño, se ejecutó un análisis de sensibilidad comparando dos factores: la capacidad de almacenamiento K y la tasa de reparación de ruta μ .

Los resultados numéricos indican que la elasticidad del Nivel de Servicio respecto a la Capacidad (K) es significativamente mayor que respecto a la gestión de la ruta. Al incrementar el parámetro K en un 50 % (simulando la inversión en infraestructura), la probabilidad de quiebre de stock bajo el escenario de estrés máximo disminuyó en un orden de magnitud.

6.3. Conclusión del Análisis

Desde una perspectiva de ingeniería de sistemas, los resultados confirman que el sistema actual carece de redundancia para tolerar fallas de modo común en el canal de transporte. La solución óptima, basada en los datos de simulación, es desacoplar las constantes de tiempo del sistema: aumentar la capacidad de almacenamiento local incrementa la constante de tiempo de descarga del inventario, permitiendo que el sistema “sobreviva” a periodos de desconexión más largos sin degradar el servicio al cliente final.

- [1] Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP). *Investigación Vulnerabilidad de Suministro de GLP y Combustibles Líquidos*. Informe Técnico. Coyhaique, Chile: Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, 2024.
- [2] Travis E. Oliphant. «Python for Scientific Computing». En: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), págs. 10-20. DOI: 10 . 1109 / MCSE . 2007 . 58.