



UNIVERSIDAD DE AYSÉN

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL INFORMÁTICA

Diseño de un Prototipo 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	III
Índice de figuras	V
Índice de cuadros	VI
1 Introducción	1
2 Planteamiento del Problema	2
2.1. Caracterización del Sistema: Un Ecosistema Energético Crítico	2
2.2. Análisis de Vulnerabilidades: La Disonancia Crítica del Sistema	3
2.3. Insuficiencia de los Marcos de Análisis y la Brecha Metodológica	5
3 Hipótesis y Pregunta de Investigación	6
3.1. Pregunta de Investigación	6
3.2. Hipótesis Central	7
4 Objetivos	8
4.1. Objetivo General	8
4.2. Objetivos Específicos	8
5 Marco Teórico	10
5.1. Teorías del Dominio del Problema: La Cadena de Suministro	10
5.2. Metodología del Dominio de la Solución: La Simulación de Sistemas . . .	13
6 Estado del Arte	15
6.1. La Simulación como Estándar en la Gestión de Riesgos Logísticos	15

6.2. El Diagnóstico de Vulnerabilidad en Aysén: Un Análisis Estático	16
6.3. Identificación del Vacío de Conocimiento y Contribución Original	17
7 Diseño Metodológico	18
7.1. Fase 1: Modelado Conceptual del Sistema (Objetivo 1)	18
7.2. Enfoque de la Investigación: Simulación como Experimentación Compu- tacional	19
7.3. Fase 2: Implementación del Prototipo (Objetivo 2)	20
7.4. Fase 3: Evaluación y Experimentación (Objetivo 3)	21
8 Conclusiones y Proyección del Trabajo	22
8.1. Síntesis del Problema y la Solución Propuesta	22
8.2. Contribuciones Esperadas	23
8.3. Limitaciones y Líneas de Trabajo Futuro	23
Referencias	25

Índice de figuras

5.1. Modelo de inventario (Q, R) con Punto de Reorden (ROP) y Stock de Seguridad (SS) bajo incertidumbre en el <i>lead time</i>	11
5.2. El <i>trade-off</i> entre eficiencia y resiliencia en la gestión de cadenas de suministro.	12
7.1. Modelo Conceptual del Sistema de Distribución de GLP.	19

Índice de cuadros

7.1. Diseño Experimental para la Evaluación de la Resiliencia.	21
--	----

CAPÍTULO 1

Introducción

La gestión de cadenas de suministro para recursos energéticos en geografías aisladas y complejas constituye un problema de optimización estocástica de alta relevancia. La inherente variabilidad de las condiciones operacionales, sumada a la criticidad de asegurar la continuidad del servicio, demanda el desarrollo de herramientas analíticas que trasciendan los enfoques determinísticos tradicionales. La Región de Aysén, en la Patagonia chilena, representa un caso de estudio paradigmático de esta problemática, particularmente en lo que respecta a su sistema de suministro de Gas Licuado de Petróleo (GLP).

El presente trabajo de tesis aborda la vulnerabilidad estructural de dicha cadena de suministro. El objetivo fundamental es el diseño y la validación de un artefacto computacional —un prototipo de simulación de eventos discretos— que permita el análisis cuantitativo de la resiliencia del sistema. Este laboratorio virtual se centrará en el nodo logístico de Coyhaique, el corazón del sistema de distribución regional, y se empleará para modelar la interacción de parámetros logísticos clave, cuantificar el impacto de escenarios de disrupción y, en última instancia, proveer una base empírica para la evaluación de estrategias de mitigación.

La investigación se estructura de manera deductiva para guiar al lector desde el contexto general hasta los detalles técnicos y los resultados. El capítulo 2 contextualiza y justifica la relevancia del problema. El capítulo 3 formaliza la pregunta de investigación y la hipótesis central que guían el estudio. El capítulo 4 delimita las metas del proyecto de manera precisa. Los capítulos 5 y 6 establecen los fundamentos teóricos y el estado del arte en la materia. Finalmente, el capítulo 7 detalla el diseño metodológico para el desarrollo y la validación del prototipo.

CAPÍTULO 2

Planteamiento del Problema

La gestión de cadenas de suministro para recursos energéticos en geografías aisladas y complejas constituye un problema de optimización estocástica de alta relevancia. La Región de Aysén, en la Patagonia chilena, representa un caso de estudio paradigmático de esta problemática, particularmente en lo que respecta a su sistema de suministro de Gas Licuado de Petróleo (GLP). Este capítulo se dedica a formalizar los elementos que configuran un escenario de riesgo sistémico, argumentando que la interacción de una alta dependencia energética, una topología logística inherentemente frágil y un documentado vacío en la planificación estratégica, demanda un nuevo enfoque analítico que los métodos estáticos actuales son incapaces de proveer.

2.1. Caracterización del Sistema: Un Ecosistema Energético Crítico

El sistema de suministro de GLP en Aysén opera bajo un conjunto de condiciones que lo definen como un sistema sociotécnico complejo y crítico. Su criticidad no se deriva de un único factor, sino de la confluencia de una demanda energética anómala y una estructura de mercado oligopólica operando sobre una infraestructura precaria.

La Dimensión de la Demanda: Criticidad y Crecimiento Sostenido

La demanda energética de la región es un factor distintivo a nivel nacional. Con un consumo per cápita de 27.25 Gcal, que excede en un 65 % la media de Chile, la población depende intensivamente de un flujo energético constante para sostener funciones

básicas. El GLP satisface nichos de consumo —cocción de alimentos y agua caliente sanitaria— para los cuales no existen sustitutos inmediatos a gran escala. Esta inelasticidad fundamental de la demanda convierte al GLP en un recurso de alta prioridad social, cuya interrupción tiene consecuencias directas e inmediatas sobre el bienestar de la población.

Adicionalmente, la demanda no es estática. El sistema enfrenta un crecimiento sostenido del 3.8 % anual, impulsado por el desarrollo demográfico y económico de la región. A esto se suma un factor disruptivo futuro: la proyectada incorporación de una central térmica que consumirá 14.4 ton/día de GLP. Este crecimiento y cambio estructural implican que la presión sobre la ya frágil cadena de suministro se intensificará de manera no lineal en los próximos años.

La Dimensión del Suministro: Topología Lineal y Soberanía Comprometida

La estructura de la cadena de suministro, detallada en el informe de referencia Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024¹, se caracteriza por una topología logística lineal con una dependencia absoluta de fuentes exógenas. El informe es categórico al afirmar que “La totalidad del gas licuado que llega a la región, lo hace vía camiones que transitan por el paso Huemules desde Argentina”. Este diseño, carente de redundancia, convierte a la ruta terrestre en un punto único de falla (*Single Point of Failure*) de manual. La magnitud de esta dependencia se cuantifica en el hecho de que el 86 % del recorrido terrestre desde la planta de Cabo Negro hasta Coyhaique transcurre por territorio argentino, lo que implica que la soberanía logística y la seguridad del suministro regional están estructuralmente comprometidas por la dinámica de un país vecino.

2.2. Análisis de Vulnerabilidades: La Disonancia Crítica del Sistema

Las vulnerabilidades del sistema no son meramente teóricas, sino que se manifiestan en una disonancia crítica: la magnitud de las amenazas exógenas supera con creces la capacidad de absorción de la fragilidad endógena del sistema.

¹El informe, encargado por la Seremía de Energía de Aysén, fue finalizado y presentado en 2025. A la fecha de esta publicación, se encuentra en proceso de difusión pública.

Vulnerabilidades Exógenas: Amenazas Recurrentes y de Larga Duración

El principal vector de riesgo es la incertidumbre estocástica en el aprovisionamiento. El informe de riesgos Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024 identifica dos amenazas dominantes. Primero, el evento de “Nevadas / Cierre cruce fronterizo” (Tag #57), clasificado con una probabilidad de Nivel 4 (“Casi Seguro”), lo que implica una frecuencia de ocurrencia de “al menos una vez cada tres meses”. Segundo, el riesgo de “Conflicto social en Argentina” (Tag #45), que, aunque menos frecuente, ha demostrado la capacidad de paralizar el suministro por períodos de hasta tres semanas. Esta realidad es corroborada por la autoridad energética regional, quien identifica la “conflictividad social” y la “mantención de los caminos” en Argentina como la principal amenaza para la continuidad del suministro (Laibe, T., comunicación personal, 11 de junio, 2025). El sistema, por tanto, enfrenta amenazas recurrentes y de duración prolongada que introducen una alta variabilidad en el tiempo de entrega (*lead time*).

Vulnerabilidades Endógenas: Un Buffer Insuficiente y Estratégicamente Degradado

Frente a una amenaza documentada de 21 días, la capacidad de respuesta del sistema es alarmantemente limitada. La infraestructura de almacenamiento primario en Coyhaique posee una capacidad nominal total de solo **431 ton**, distribuidas entre Abastible (150 ton), Lipigas (240 ton) y Gasco (41 ton) Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024. Esta capacidad se traduce en una autonomía teórica de apenas **8.2 días** para el mes de mayor venta.

Esta fragilidad no es solo una limitación física, sino el resultado de una dinámica de mercado adversa. El informe evidencia que “por empresas los números son mucho más ajustados para Gasco que tiene una capacidad demasiado reducida para su nivel de ventas” Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024. Este hecho es la manifestación práctica de un “Dilema del Prisionero”: en un mercado oligopólico, la estrategia individualmente racional de minimizar costos de capital (manteniendo un inventario bajo) es adoptada por al menos un actor, lo que degrada la resiliencia colectiva y deja al sistema entero expuesto.

2.3. Insuficiencia de los Marcos de Análisis y la Brecha Metodológica

El marco de planificación regional y las herramientas de análisis existentes son inadecuados para gestionar la compleja interacción de las vulnerabilidades descritas.

Primero, existe un documentado vacío estratégico. La ‘Política Energética 2050 Región de Aysén’ centra sus esfuerzos de seguridad energética exclusivamente en el sector eléctrico, omitiendo un tratamiento formal para la cadena de suministro de combustibles.

Segundo, el diagnóstico técnico disponible Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024, si bien es exhaustivo, es de naturaleza estática. Propone un portafolio de soluciones, como el aumento de la capacidad de almacenamiento en 250 ton con una inversión estimada de 1.5 millones de USD, pero no provee un método para evaluar su retorno en resiliencia. La matriz de riesgos evalúa probabilidad e impacto de forma aislada, pero no puede capturar los efectos en cascada de una disrupción a lo largo del tiempo.

Esta insuficiencia se materializa en la práctica operativa de la gestión de crisis regional. Como lo confirma la autoridad regional, dicha gestión se basa en protocolos reactivos y manuales, donde el proceso implica “llamar a todas las empresas, construir un Excel y, más o menos, sacar una foto de cuánta disponibilidad de combustible hay” (Laibe, T., comunicación personal, 11 de junio, 2025). Este enfoque, calificado como “rudimentario”, es la prueba fehaciente de la ausencia de una plataforma de análisis dinámico.

La brecha metodológica es, por tanto, clara: se carece de una herramienta que permita un análisis dinámico y cuantitativo para responder preguntas de ingeniería y gestión de inversiones, tales como:

¿Cuál es la reducción porcentual en la probabilidad de quiebre de stock que se obtiene de una inversión de \$1.5 M, bajo un escenario de disrupciones con una frecuencia de Nivel 4 y una duración estocástica, considerando además la demanda adicional de la nueva central térmica?

CAPÍTULO 3

Hipótesis y Pregunta de Investigación

El análisis del problema, expuesto en el capítulo 2, revela un sistema sociotécnico complejo, dominado por la interacción de variables estocásticas y decisiones estratégicas. La disonancia entre la magnitud de las amenazas exógenas y la limitada capacidad de respuesta endógena sugiere que no todos los parámetros del sistema contribuyen de igual manera a su vulnerabilidad global. Para abordar esta complejidad de manera científica, es imperativo formular una pregunta de investigación que guíe el diseño de una herramienta de análisis cuantitativo, y una hipótesis falsificable que postule una relación de sensibilidad entre los factores críticos del sistema.

3.1. Pregunta de Investigación

Considerando la caracterización del sistema, sus vulnerabilidades y la identificada brecha metodológica en los marcos de análisis actuales, la pregunta central que esta investigación de ingeniería busca responder es:

¿Cómo puede un prototipo de simulación de eventos discretos ser diseñado, implementado y validado como un método riguroso para cuantificar el impacto de parámetros logísticos críticos —tales como la duración estocástica de las interrupciones de ruta y las políticas de inventario internas— sobre la resiliencia del sistema de suministro de GLP en Aysén?

Esta pregunta no solo aborda la construcción de un artefacto computacional, sino también la validación de su utilidad como un laboratorio virtual para el análisis de un sistema sociotécnico de alta criticidad.

3.2. Hipótesis Central

Como una respuesta conjetural y testable a la pregunta de investigación, y derivada directamente de la disonancia identificada en el planteamiento del problema, se postula la siguiente hipótesis central:

Hipótesis: La resiliencia del sistema de suministro de GLP de Aysén, cuantificada a través de métricas de rendimiento como el Nivel de Servicio, exhibe una sensibilidad significativamente mayor a la variabilidad de los parámetros exógenos que a la de los parámetros endógenos. Específicamente, se postula que la elasticidad de la resiliencia con respecto a la duración de las interrupciones de ruta es superior a su elasticidad con respecto a las variaciones en la capacidad de almacenamiento primario.

Esta hipótesis formaliza la intuición de que la magnitud de las amenazas externas (ej. un corte de 21 días) es el factor dominante que gobierna el comportamiento del sistema, por sobre las mejoras incrementales en la capacidad de respuesta interna (ej. aumentar el inventario de 8 a 12 días de autonomía). El diseño experimental, detallado en el capítulo 7, está específicamente concebido para proveer la evidencia estadística necesaria para confirmar o refutar esta afirmación, jerarquizando así las palancas de acción más efectivas para fortalecer la seguridad energética regional.

CAPÍTULO 4

Objetivos

Para abordar la brecha metodológica identificada en el capítulo 2 y responder a la pregunta de investigación formulada, el presente proyecto se estructura en torno a un conjunto de objetivos jerárquicos. Estos objetivos guían el proceso de diseño, desarrollo y validación del artefacto computacional propuesto, asegurando un enfoque sistemático para la creación de un laboratorio virtual que permita el análisis dinámico de la resiliencia del sistema de suministro de GLP.

4.1. Objetivo General

Diseñar un prototipo de simulación de eventos discretos, validado computacionalmente, para cuantificar el impacto de parámetros logísticos críticos sobre la resiliencia del sistema de suministro de GLP en el nodo Coyhaique.

4.2. Objetivos Específicos

La consecución del objetivo general se desglosa en tres fases metodológicas secuenciales, cada una representada por un objetivo específico que define una etapa clave del proceso de investigación y desarrollo:

1. **Modelar** la dinámica conceptual de la cadena de suministro de GLP en Coyhaique, realizando una abstracción formal de sus componentes, procesos y parámetros clave a partir de la información técnica disponible.

2. **Implementar** un prototipo computacional del modelo de simulación, desarrollando una arquitectura de software parametrizable que traduzca el modelo conceptual a un artefacto funcional y experimental.
3. **Evaluar** la resiliencia del sistema mediante la ejecución de un diseño experimental sobre el prototipo validado, utilizando la simulación para generar la evidencia empírica necesaria para confirmar o refutar la hipótesis de trabajo.

CAPÍTULO 5

Marco Teórico

El diseño de un artefacto computacional para el análisis de un sistema sociotécnico complejo requiere un fundamento dual. Por un lado, es preciso establecer el marco conceptual que gobierna la dinámica del sistema real —el dominio del problema—. Por otro, se debe formalizar la metodología de análisis seleccionada para estudiar dicho sistema —el dominio de la solución—. Este capítulo establece ambos fundamentos, proporcionando el andamiaje teórico y técnico para el diseño del prototipo de simulación y la posterior interpretación de sus resultados.

5.1. Teorías del Dominio del Problema: La Cadena de Suministro

Dinámica y Control de Inventarios en Entornos Estocásticos

El núcleo de cualquier cadena de suministro es la gestión de su inventario. La dinámica del nivel de inventario I en una planta a lo largo del tiempo t puede ser descrita por la ecuación fundamental de balance:

$$I(t) = I(t-1) - D(t) + A(t)$$

donde $D(t)$ es la demanda agregada durante el período t , y $A(t)$ es la cantidad de producto que llega (arribos) en el mismo período. En un entorno estocástico como el de Aysén, tanto la demanda $D(t)$ como, y de forma más crítica, el tiempo de entrega (*lead time*, LT) que determina los arribos $A(t)$, son variables aleatorias.

Para gestionar esta incertidumbre, la teoría de control de inventarios establece políticas de reabastecimiento. Para este estudio, se adopta un modelo de revisión continua

(Q, R) , donde se ordena una cantidad fija Q cada vez que el inventario alcanza un Punto de Reorden R .

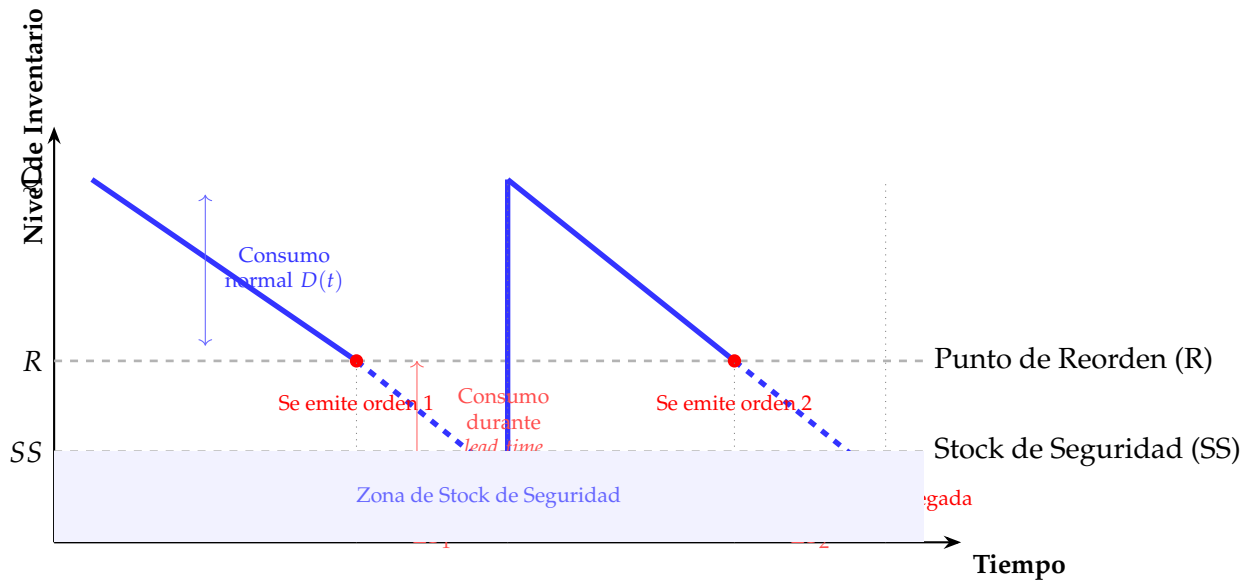


Figura 5.1: Modelo de inventario (Q, R) con Punto de Reorden (ROP) y Stock de Seguridad (SS) bajo incertidumbre en el *lead time*.

ig:inventory-model-detailed

El cálculo del Punto de Reorden se formaliza como:

$$R = (\bar{D} \times \bar{LT}) + SS$$

donde \bar{D} es la demanda promedio y \bar{LT} es el *lead time* promedio. El componente crucial es el Stock de Seguridad (SS), el buffer que protege contra la variabilidad. Se calcula como:

$$SS = Z_{\alpha} \times \sqrt{\bar{LT}\sigma_D^2 + \bar{D}^2\sigma_{LT}^2}$$

donde Z_{α} es el factor de servicio para un nivel de servicio deseado α , σ_D es la desviación estándar de la demanda, y σ_{LT} es la desviación estándar del *lead time*. Dado que en Aysén la demanda es relativamente estable pero el *lead time* es altamente volátil, la ecuación se simplifica y evidencia que $SS \propto \sigma_{LT}$. Esto formaliza matemáticamente la vulnerabilidad central del sistema: una alta variabilidad en el tiempo de la ruta (σ_{LT} elevado) exige un alto stock de seguridad para mantener la continuidad del servicio.

El Paradigma de la Resiliencia Logística

El paradigma tradicional de la eficiencia ha sido complementado por el enfoque de la resiliencia, definida como la capacidad de una cadena de suministro para absorber,

adaptarse y recuperarse de disrupciones Christopher y Peck, 2004. Este concepto introduce un *trade-off* fundamental entre la eficiencia (minimización de costos) y la robustez (inversión en redundancia). El sistema de Aysén, como se ilustra en la Figura ??, se encuentra posicionado en una zona de aparente eficiencia pero de alta vulnerabilidad.

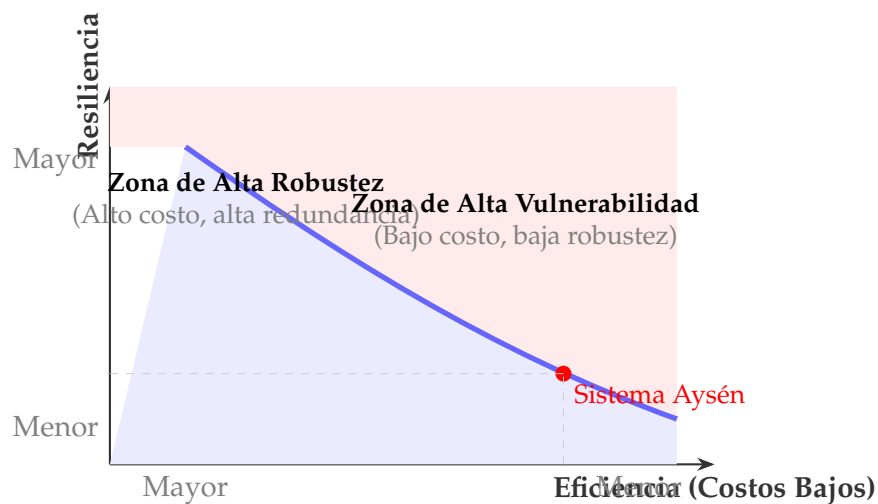


Figura 5.2: El *trade-off* entre eficiencia y resiliencia en la gestión de cadenas de suministro.

ig:resilience-tradeoff

Dinámicas de Competencia y Coordinación: El Aporte de la Teoría de Juegos

La estructura de mercado oligopólica del GLP en Aysén introduce una capa de complejidad estratégica. La teoría de juegos, y en particular el modelo del “Dilema del Prisionero”, ofrece un marco formal para entender por qué la acción racional individual (minimizar costos de inventario) puede conducir a un resultado colectivo subóptimo (baja resiliencia sistémica). La evidencia de que un actor opera con una capacidad “demasiado reducida para su nivel de ventas” Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024 sugiere que esta dinámica no es solo teórica, sino una práctica observable en el sistema bajo estudio.

5.2. Metodología del Dominio de la Solución: La Simulación de Sistemas

La simulación es la imitación del funcionamiento de un sistema del mundo real a lo largo del tiempo Law, 2015. Para un sistema estocástico y dinámico como el de Aysén, es la única metodología viable para evaluar el impacto de diferentes políticas bajo incertidumbre.

Simulación de Eventos Discretos (SED)

La SED es un paradigma de modelado que representa un sistema como una secuencia cronológica de eventos Banks et al., 2010. Los componentes fundamentales de nuestro modelo SED son:

Entidades CamiónSuministro (con atributos: capacidad, origen).

Recursos PlantaAlmacenamiento (con atributos: capacidad_max, nivel_inventario, ROP), RutaTerrestre (con estado: abierta/cerrada).

Procesos GeneracionPedidos (cuando $I(t) \leq R$), ViajeSuministro (proceso estocástico con duración LT), ConsumoDiario (reduce $I(t)$), GeneradorDisrupciones (cambia el estado de la RutaTerrestre).

Protocolos de Credibilidad: Verificación y Validación (V&V)

La credibilidad de un estudio de simulación depende críticamente de un proceso formal de V&V.

- **Verificación:** *¿Se construyó el modelo correctamente?* Se asegura que el código implementa fielmente el modelo conceptual.
- **Validación:** *¿Se construyó el modelo correcto?* Se determina si el modelo es una representación suficientemente precisa del sistema real, comparando sus salidas con datos históricos y juicio de expertos.

Análisis de Resultados: Diseño de Experimentos (DoE)

Una vez validado, el modelo se usa para la experimentación. El DoE es el marco formal para variar sistemáticamente los factores de entrada (ej. capacidad de almacenamiento) para cuantificar su efecto en las métricas de respuesta (ej. Nivel de Servicio

α). El análisis estadístico de estos resultados (ej. ANOVA) permite identificar los parámetros más influyentes y probar hipótesis de manera rigurosa.

CAPÍTULO 6

Estado del Arte

Para establecer la originalidad y pertinencia de esta investigación, es necesario situarla en el contexto del conocimiento y la práctica existentes. Este capítulo realiza una revisión crítica en dos frentes: primero, el estado de la práctica en el uso de la simulación para la gestión de riesgos logísticos a nivel global; y segundo, el estado del diagnóstico técnico sobre la vulnerabilidad del suministro energético en Aysén. El objetivo es demostrar que, si bien ambas áreas están desarrolladas por separado, existe una brecha significativa en su intersección, la cual este proyecto se propone cerrar.

6.1. La Simulación como Estándar en la Gestión de Riesgos Logísticos

La simulación de eventos discretos (SED) no es una metodología académica incipiente, sino una herramienta consolidada y considerada el estándar de oro para el análisis y la optimización de cadenas de suministro complejas. Su aplicación es transversal, desde el sector comercial hasta el humanitario.

En la industria, corporaciones con operaciones logísticas de alta intensidad como Amazon, FedEx o Intel, emplean modelos de simulación de forma rutinaria para la toma de decisiones estratégicas. Estos modelos se utilizan para el diseño de redes de distribución, la optimización de operaciones en centros de almacenamiento y, de manera crucial, para el análisis de riesgos y la planificación de la continuidad del negocio (*Business Continuity Planning*). La simulación permite a estas organizaciones cuantificar el impacto de escenarios de disrupción —fallas en infraestructura, huelgas, eventos

climáticos extremos— y evaluar la efectividad de planes de contingencia antes de que ocurran, optimizando así el trade-off entre costo y resiliencia Banks et al., 2010.

De manera análoga, en el ámbito de la logística humanitaria, organizaciones como el Programa Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas (WFP) utilizan la simulación para planificar la distribución de ayuda ante desastres naturales. Estos modelos son fundamentales para decidir sobre el pre-posicionamiento de inventarios críticos (alimentos, medicinas) y para optimizar las rutas de distribución en entornos caóticos y con infraestructura dañada Law, 2015. Estos casos de estudio demuestran que la simulación es la metodología por excelencia para analizar sistemas donde la incertidumbre, la complejidad y el riesgo son factores dominantes.

6.2. El Diagnóstico de Vulnerabilidad en Aysén: Un Análisis Estático

El informe “Investigación Vulnerabilidad de Suministro de GLP y Combustibles Líquidos” Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024 constituye el diagnóstico técnico más completo y actualizado del sistema bajo estudio. Este documento provee una “anatomía” detallada de la cadena de suministro, pero no un análisis de su “fisiología” bajo estrés. Sus contribuciones y limitaciones pueden resumirse en:

- **Fortaleza (Caracterización Exhaustiva):** El informe realiza un análisis descriptivo profundo de la demanda, las rutas, las capacidades de almacenamiento y los actores del sistema. Provee los datos agregados y las descripciones cualitativas que sirven como base indispensable para la parametrización de cualquier modelo cuantitativo.
- **Limitación (Naturaleza Estática):** Su principal herramienta analítica es una matriz de riesgos que evalúa probabilidad e impacto de forma aislada. Este enfoque, si bien es útil para la identificación y priorización inicial, es inherentemente estático. No puede capturar la dinámica temporal del sistema, los efectos en cascada de una disrupción, ni la interacción no lineal entre los parámetros (ej. cómo una disrupción de 15 días impacta de forma diferente si ocurre en temporada de alta o baja demanda).

En esencia, el informe responde a la pregunta de qué puede fallar, pero no provee una herramienta para responder a las preguntas de cuánto, cuándo y con qué probabilidad

el sistema completo fallará.

6.3. Identificación del Vacío de Conocimiento y Contribución Original

La revisión del estado del arte revela una situación paradójica: por un lado, la práctica industrial y académica ha establecido la simulación como la herramienta idónea para analizar la resiliencia de cadenas de suministro; por otro, el diagnóstico más completo sobre la cadena de suministro de GLP en Aysén carece de este tipo de análisis dinámico.

El vacío de conocimiento que este proyecto aborda, por lo tanto, no es de naturaleza teórica, sino de aplicación metodológica a un problema específico, validado y de alta criticidad. La contribución original de esta tesis radica en desarrollar el artefacto computacional que cierra esa brecha.

De manera explícita, este trabajo ejecuta la iniciativa de gestión 11.11: “Simulación de emergencias energéticas”, propuesta en el propio informe de referencia Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024. El informe califica la simulación como una “buena práctica” para la región y establece la meta de “Realizar cada 2-3 años un ejercicio de simulación”. Mientras el informe propone esta necesidad, y la autoridad regional la valida al identificar la urgencia de un “mecanismo que permita hacer un monitoreo permanente y en tiempo real” (Laibe, T., comunicación personal, 11 de junio, 2025), este proyecto de tesis diseña, implementa y valida el artefacto que permite llevar a cabo dicha tarea.

Adicionalmente, el proyecto aborda una brecha de capacidad institucional identificada por la propia autoridad regional. La falta de personal técnico especializado para el monitoreo continuo de los hidrocarburos amplifica la necesidad de una herramienta como la propuesta, que no solo permite análisis más sofisticados, sino que también actúa como un multiplicador de capacidades, encapsulando conocimiento experto para potenciar la toma de decisiones de los equipos de gestión existentes.

CAPÍTULO 7

Diseño Metodológico

Este capítulo detalla el plan de trabajo y el conjunto de métodos formales que se emplearán para alcanzar los objetivos de la investigación. El enfoque se enmarca en las disciplinas de la Ciencia Computacional y la Ingeniería de Sistemas, adoptando un proceso sistemático para el diseño, la implementación y la evaluación de un artefacto computacional. El propósito es establecer un marco de trabajo riguroso, transparente y, fundamentalmente, replicable.

7.1. Fase 1: Modelado Conceptual del Sistema (Objetivo 1)

El objetivo de esta fase es la abstracción formal del sistema real en un modelo conceptual que sirva como especificación para la implementación.

Definición de Límites y Supuestos del Modelo

Para abordar el problema regional de manera cuantitativa, es imperativo establecer un límite de sistema (*system boundary*) claro para el modelo computacional. Si bien el impacto de una disrupción en el suministro de GLP es de alcance regional, el centro de gravedad logístico y el punto de control más crítico de la cadena se encuentra en el nodo de almacenamiento primario de Coyhaique.

Por consiguiente, el modelo se centrará en la dinámica de inventarios de las tres plantas mayoristas ubicadas en dicho nodo. Se modelará el flujo de suministro desde los puntos de origen (Neuquén y Cabo Negro) hasta estas plantas, y la salida de pro-

ducto se modelará como una demanda agregada que representa el consumo de la zona de influencia directa.

Este enfoque se justifica porque la resiliencia del nodo de Coyhaique actúa como un **proxy directo** de la resiliencia de toda la región. Un quiebre de stock en este punto neurálgico implica, por definición, la incapacidad de abastecer a las demás localidades. La modelización de la red de distribución de última milla y las dinámicas de inventario en otros puntos de la región quedan fuera del alcance de este estudio y se plantean como líneas de trabajo futuro.

7.2. Enfoque de la Investigación: Simulación como Experimentación Computacional

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo basado en la simulación como método de experimentación computacional. Dada la naturaleza estocástica y dinámicamente compleja de la cadena de suministro de GLP, los modelos puramente analíticos son insuficientes. La simulación permite la creación de un laboratorio virtual donde se pueden probar hipótesis y evaluar políticas bajo condiciones controladas, algo inviable en el sistema real. El desarrollo se estructura en las tres fases ilustradas en la Figura ??.

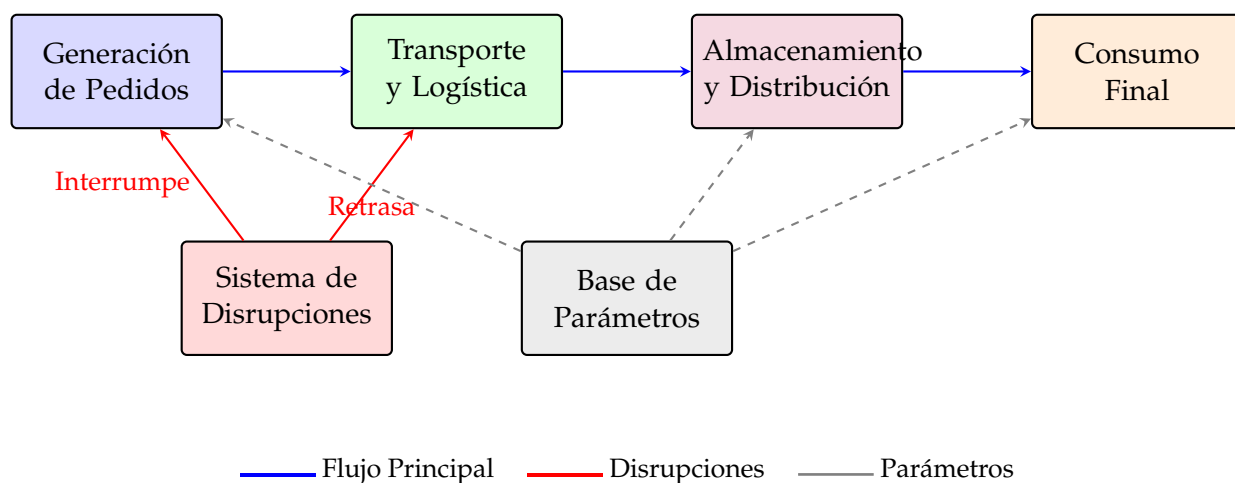


Figura 7.1: Modelo Conceptual del Sistema de Distribución de GLP.

ig:conceptual-diagram-detailed

Parametrización y Modelado Estocástico

Los parámetros deterministas (ej. capacidad de almacenamiento por empresa) se tomarán directamente del informe Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024. Las variables estocásticas se modelarán mediante distribuciones de probabilidad:

- **Tiempo entre Disrupciones:** Se modelará como una variable aleatoria de una distribución **Exponencial**(λ), donde la tasa λ se calibrará según la frecuencia de Nivel 4 (1/90 días).
- **Duración de Disrupciones:** Se modelará con una distribución **Triangular**(a, b, c), donde los parámetros (mínimo, más probable, máximo) se basarán en los datos históricos (ej. 21 días para conflictos sociales).
- **Demanda Diaria $D(t)$:** Se modelará como un proceso estocástico con tendencia y estacionalidad:

$$D(t) = \text{Base} \cdot (1 + g)^t + S(t) + \epsilon$$

donde g es la tasa de crecimiento, $S(t)$ es el componente estacional y ϵ es un ruido aleatorio.

7.3. Fase 2: Implementación del Prototipo (Objetivo 2)

Stack Tecnológico y Arquitectura de Software

La selección de herramientas busca maximizar la flexibilidad y la reproducibilidad científica:

- **Núcleo:** **Python 3.x** y **SimPy**, por su capacidad para modelar procesos complejos de forma nativa.
- **Análisis y Visualización:** **Pandas**, **Matplotlib**, y **Seaborn** para el procesamiento de datos y la generación de gráficos.
- **Reproducibilidad:** Se utilizará **Git** para el control de versiones y un gestor de entornos virtuales (**venv** o **Conda**) para encapsular las dependencias.

La arquitectura del software seguirá un patrón **Modelo-Experimento-Análisis**, separando la lógica de la simulación (`modelo.py`), de la orquestación de escenarios (`experimento.py`) y de los scripts de análisis (`analisis.py`). Los parámetros se externalizarán a un archivo `config.json`.

7.4. Fase 3: Evaluación y Experimentación (Objetivo 3)

Protocolo de Verificación y Validación (V&V)

- Se aplicará un protocolo formal para establecer la credibilidad del modelo:
- **Verificación:** Se realizarán *code walkthroughs* y pruebas de componentes deterministas para asegurar que el código refleja el modelo conceptual.
 - **Validación:** Se empleará un enfoque de múltiples facetas:
 - **Validación de Datos Históricos:** Se compararán las distribuciones estadísticas (media, varianza) de las métricas clave del modelo (ej. días de autonomía) con los valores de referencia del informe Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA, 2024 (ej. media de 8.2 días).
 - **Validación por Juicio de Expertos (Face Validity):** Se realizarán “pruebas de Turing” para modelos, donde se presentarán trazas de salida del modelo a los expertos técnicos de la SEC para que evalúen su plausibilidad operativa.

Diseño de Experimentos (DoE)

Para probar la hipótesis central, se ejecutará un **Diseño Factorial** 2×3 . Se realizarán múltiples replicaciones para cada combinación de factores para capturar la variabilidad estocástica.

Cuadro 7.1: Diseño Experimental para la Evaluación de la Resiliencia.

Componente		Especificación
ab:doe	Factores	1. Capacidad de Almacenamiento (Endógeno) 2. Duración de Disrupción (Exógeno)
	Niveles Factor 1	Nivel 1: Status Quo (431 ton) Nivel 2: Propuesta 10.4 (681 ton)
	Niveles Factor 2	Nivel 1: Corta (7 días) Nivel 2: Media (14 días) Nivel 3: Larga (21 días)
	Variables de Respuesta (KPIs)	1. Nivel de Servicio (%) 2. Probabilidad de Quiebre de Stock

Los resultados se analizarán mediante un **Análisis de Varianza (ANOVA)** para determinar la significancia estadística de los efectos principales de cada factor y de sus interacciones, proveyendo así la evidencia para confirmar o refutar la hipótesis.

CAPÍTULO 8

Conclusiones y Proyección del Trabajo

Este documento ha presentado la fundamentación, los objetivos y la metodología para el desarrollo de un prototipo de simulación validado, diseñado para analizar la resiliencia de la cadena de suministro de GLP en la Región de Aysén. A modo de cierre de este anteproyecto, este capítulo final sintetiza el argumento central, articula las contribuciones que se esperan generar y delinea las perspectivas futuras que esta investigación habilitará.

8.1. Síntesis del Problema y la Solución Propuesta

Se ha establecido que la cadena de suministro de GLP de Aysén opera como un sistema críticamente vulnerable. Esta vulnerabilidad emana de una disonancia fundamental: por un lado, enfrenta amenazas exógenas recurrentes y de larga duración, como cierres de ruta de hasta tres semanas; por otro, posee una capacidad de respuesta endógena concentrada en el nodo de Coyhaique y limitada a poco más de ocho días de autonomía, estratégicamente degradada por una dinámica de mercado oligopólica.

Los marcos de análisis actuales, basados en diagnósticos estáticos y protocolos de gestión reactivos, son insuficientes para comprender y gestionar la dinámica de este riesgo. Frente a esta brecha metodológica, este proyecto propone el diseño, implementación y validación de un artefacto computacional de simulación de eventos discretos. Este laboratorio virtual permitirá modelar la interacción de las variables del sistema y cuantificar su comportamiento bajo estrés, superando las limitaciones del análisis estático.

8.2. Contribuciones Esperadas

Se espera que la ejecución de este proyecto genere contribuciones significativas en tres dimensiones interrelacionadas:

Contribución Metodológica: Se introducirá un paradigma de análisis dinámico y estocástico en un dominio actualmente evaluado con herramientas estáticas. El prototipo permitirá pasar de la identificación de riesgos a la cuantificación de la resiliencia, proveyendo un marco para evaluar el sistema no en su estado promedio, sino en sus extremos.

Contribución Práctica Regional: Se entregará una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para actores clave como la Seremía de Energía y la SEC. El prototipo permitirá evaluar el “retorno en resiliencia” de inversiones en infraestructura (ej. aumento de almacenamiento), proveyendo una base empírica para la asignación de recursos y la formulación de políticas públicas.

Contribución Institucional: Al encapsular conocimiento experto y una metodología de análisis compleja en un artefacto de software usable, el proyecto actúa como un multiplicador de capacidades. Aborda la brecha de capital humano técnico identificada por la autoridad regional, potenciando la capacidad de análisis de los equipos de gestión existentes.

8.3. Limitaciones y Líneas de Trabajo Futuro

Todo modelo es, por definición, una simplificación de la realidad. Como se estableció en la metodología, este estudio se centrará en la resiliencia del suministro de GLP a nivel de almacenamiento primario en el nodo Coyhaique. Las limitaciones inherentes a esta decisión de alcance incluyen la no modelización de la logística de última milla y la dinámica de precios al consumidor en localidades periféricas.

No obstante, el prototipo validado sentará las bases para una robusta agenda de investigación futura. Las extensiones naturales del trabajo incluyen:

- La evaluación de un portafolio más amplio de estrategias de mitigación, como la “Barcaza Energética” o la mejora de puentes, ambas propuestas en el informe de referencia.
- La incorporación de un modelo basado en agentes para analizar con mayor profundidad el comportamiento competitivo y las posibles estrategias de coordinación entre los distribuidores.

- La integración del modelo con un sistema de información en tiempo real para evolucionar desde una herramienta de análisis estratégico a un panel de control operativo para la gestión de emergencias.

En conclusión, este proyecto no solo busca responder una pregunta de investigación específica, sino también construir una plataforma metodológica y computacional escalable, con el potencial de convertirse en un activo estratégico para la seguridad energética de la Región de Aysén.

Referencias

- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2010). *Discrete-Event System Simulation* (5th). Prentice Hall.
- Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA. (2024). *Investigación Vulnerabilidad de Suministro de GLP y Combustibles Líquidos* (inf. téc.) (Informe final preparado para la Seremía de Energía de la Región de Aysén. Documento público pendiente de publicación oficial a la fecha de esta tesis.). Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.
- Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the Resilient Supply Chain. *The International Journal of Logistics Management*, 15(2), 1-14.
- Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis* (5th). McGraw-Hill Education.