



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	VII
Índice de cuadros	XI
1 Introducción	1
1.1. Contexto: Vulnerabilidad Energética en Zonas Remotas	1
1.2. El Caso de la Región de Aysén: Un Sistema en el Límite	2
1.3. Pregunta de Investigación y Contribución	5
1.4. Objetivos y Alcance	6
1.5. Estructura del Documento	6
2 Planteamiento del Problema	7
2.1. Caracterización del Sistema	7
2.2. Análisis de vulnerabilidades	8
2.3. Limitaciones del diagnóstico actual	9
3 Pregunta de Investigación e Hipótesis	11
3.1. Pregunta de Investigación	11
3.2. Hipótesis Central	11
4 Objetivos	13
4.1. Objetivo General	13

4.2. Objetivos Específicos	13
5 Marco Teórico	15
5.1. Gestión de Inventarios en Cadenas de Suministro	15
5.2. Simulación de Eventos Discretos	20
6 Estado del Arte	27
6.1. DES en Cadenas de Suministro: Aplicaciones Consolidadas	27
6.2. Modelos DES de Políticas de Inventario bajo Incertidumbre	28
6.3. Diagnóstico del Sistema GLP Aysén	29
6.4. Vacío Metodológico	30
6.5. Contribución de esta Tesis	31
7 Diseño Metodológico	32
7.1. Fase 1: Modelo Conceptual	32
7.2. Fase 2: Implementación del Prototipo (Objetivo 2)	35
7.3. Fase 3: Evaluación y Experimentación (Objetivo 3)	39
8 Resultados	41
8.1. Casos de Prueba: Comportamiento Dinámico del Sistema	41
8.2. Validación del Modelo de Simulación	48
8.3. Análisis Descriptivo del Rendimiento	49
8.4. Análisis Estadístico Inferencial	57
8.5. Prueba de Hipótesis: Análisis de Sensibilidad	61
8.6. Rendimiento Computacional del Experimento	63
8.7. Resumen del Capítulo	65
9 Discusión	66
9.1. Interpretación de los Hallazgos	66
9.2. Alcance y rango de validez del modelo	67
9.3. Limitaciones del Estudio	68
9.4. Trabajo futuro	70

10 Conclusiones y Proyección del Trabajo	71
10.1. Síntesis del Problema y la Solución Propuesta	71
10.2. Contribuciones Esperadas	72
10.3. Limitaciones y Líneas de Trabajo Futuro	72
Referencias	74
Código Fuente del Simulador	76
Módulo de Configuración	76
Módulo de Entidades	78
Módulo de Simulación	80
Repositorio Completo	82

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Ubicación geográfica de la Región de Aysén y la Ruta 7. Fuente: Elaboración propia con datos de [5].	2
5.1. Modelo de inventario (Q, R) con Punto de Reorden (ROP) y Stock de Seguridad (SS).	16
5.2. Frontera eficiente entre eficiencia y resiliencia en cadenas de suministro. . .	20
5.3. Arquitectura modular del sistema de simulación en tres capas.	21
5.4. Diagrama de interacción de los tres procesos concurrentes del simulador. . .	23
5.5. Diagrama de flujo del proceso de reabastecimiento basado en política (Q, R) . .	24
5.6. Diagrama de flujo del proceso de generación de interrupciones.	25
5.7. Máquina de estados de la Ruta 7 (operativa/bloqueada).	25
7.1. Modelo conceptual del sistema de distribución de GLP en Aysén.	33
7.2. Diagrama de clases UML del simulador.	37
8.1. Caso 1: Escenario normal con interrupciones cortas (máximo 7 días).	42
8.2. Caso 2: Escenario crítico con interrupciones prolongadas (21 días).	44
8.3. Caso 3: Comparación de capacidades bajo mismo escenario de interrupciones. .	46
8.4. Distribuciones del nivel de servicio por configuración experimental (violin plots).	50
8.5. Distribución KDE: Status Quo con interrupciones cortas (7 días). Media: 84.32 %, DE: 3.49 %.	51
8.6. Distribución KDE: Status Quo con interrupciones medias (14 días). Media: 81.14 %, DE: 3.76 %.	51
8.7. Distribución KDE: Status Quo con interrupciones largas (21 días). Media: 78.13 %, DE: 4.48 %.	52

8.8. Distribución KDE: Propuesta con interrupciones cortas (7 días). Media: 98.82 %, DE: 1.15 %.	52
8.9. Distribución KDE: Propuesta con interrupciones medias (14 días). Media: 97.22 %, DE: 2.30 %.	53
8.10. Distribución KDE: Propuesta con interrupciones largas (21 días). Media: 94.70 %, DE: 3.97 %.	53
8.11. Q-Q Plot: Status Quo - Interrupciones cortas. El test de Shapiro-Wilk evalúa la hipótesis de normalidad.	54
8.12. Q-Q Plot: Status Quo - Interrupciones medias.	55
8.13. Q-Q Plot: Status Quo - Interrupciones largas.	56
8.14. Q-Q Plot: Propuesta - Interrupciones cortas.	57
8.15. Q-Q Plot: Propuesta - Interrupciones medias.	58
8.16. Q-Q Plot: Propuesta - Interrupciones largas.	59
8.17. Efectos principales de los factores experimentales sobre el nivel de servicio.	59
8.18. Nivel de servicio promedio por combinación de factores. Los valores más bajos (rojos) indican menor resiliencia del sistema.	60
8.19. Análisis de sensibilidad comparativo (tornado diagram).	62
8.20. Comparación de configuraciones experimentales (boxplots).	63

ÍNDICE DE CUADROS

7.1. Diseño Experimental Monte Carlo para Evaluación de Resiliencia.	40
8.1. Parámetros de entrada del modelo de simulación.	48
8.2. Estadísticas descriptivas del nivel de servicio (%) por configuración.	49
8.3. Análisis de Varianza (ANOVA) de dos vías para el nivel de servicio.	56
8.4. Métricas de rendimiento del experimento Monte Carlo.	64

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto: Vulnerabilidad Energética en Zonas Remotas

La seguridad energética en regiones remotas es un desafío global reconocido en la literatura académica reciente. Un estudio de 2025 sobre islas y regiones aisladas identifica que estas zonas enfrentan vulnerabilidades únicas: dependencia de suministros externos, infraestructura logística precaria, y exposición a disrupciones climáticas y geopolíticas[1]. Estas regiones operan, paradójicamente, en un régimen de alta demanda específica (consumo per cápita elevado debido a condiciones climáticas extremas) y baja redundancia de suministro (cadenas logísticas lineales sin alternativas).

La literatura sobre resiliencia de cadenas de suministro distingue entre *vulnerabilidad* (exposición a amenazas) y *resiliencia* (capacidad de absorción y recuperación)[2, 3]. Las cadenas de suministro energético en zonas remotas exhiben alta vulnerabilidad estructural: topologías lineales, largas distancias de transporte, y dependencia de infraestructura crítica (puentes, pasos fronterizos, rutas únicas)[4]. Cuando estas cadenas enfrentan disrupciones prolongadas, el impacto social es inmediato y severo: pérdida de calefacción en climas extremos, interrupción de servicios esenciales (hospitales, escuelas), y riesgo de colapso de actividades económicas locales.

Un caso paradigmático de esta realidad se encuentra en la Patagonia chilena, específicamente en la Región de Aysén.

1.2. El Caso de la Región de Aysén: Un Sistema en el Límite

La Región de Aysén se ubica en la Patagonia chilena, a más de 1,600 km al sur de Santiago. Con 103,000 habitantes dispersos en 108,494 km² (densidad: 0.95 hab/km²), la región enfrenta condiciones que la convierten en un laboratorio natural para el estudio de vulnerabilidad energética. El clima patagónico impone demandas energéticas extremas: temperaturas invernales de hasta -20°C , precipitaciones anuales superiores a 3,000 mm en zonas cordilleranas, y vientos constantes de más de 100 km/h.

El suministro de GLP a la región depende de una única vía de acceso terrestre desde Argentina: la Ruta 7, que conecta las plantas de Cabo Negro y Neuquén (Argentina) con Coyhaique a través de un trayecto de aproximadamente 1,400 km. Como muestra la Figura ??, el 86 % de este trayecto transcurre en territorio argentino, atravesando el paso fronterizo Huemules antes de ingresar a Chile. Esta dependencia de una infraestructura lineal sin redundancia configura una vulnerabilidad estructural crítica del sistema de suministro.

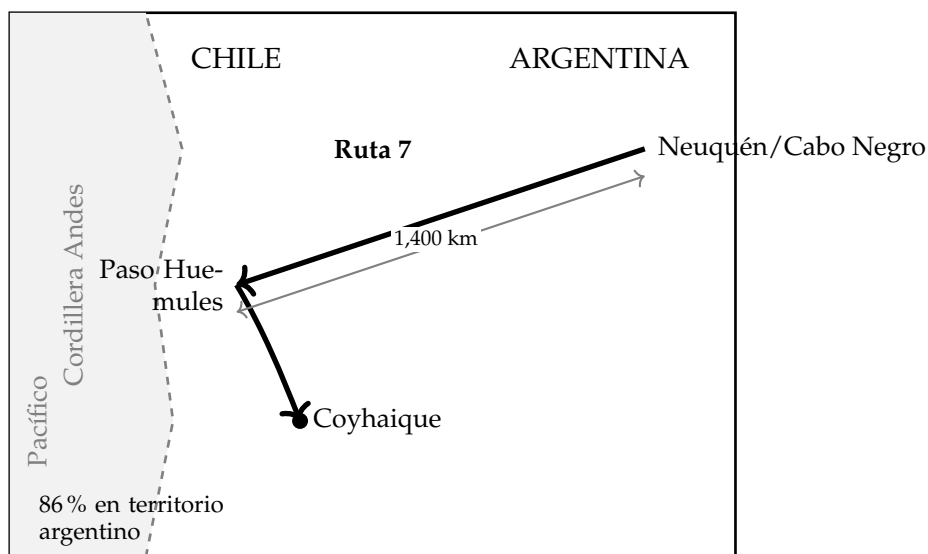


Figura 1.1: Ubicación geográfica de la Región de Aysén y la Ruta 7. Fuente: Elaboración propia con datos de [5].

ig:mapa-aysen

En este contexto, el Gas Licuado de Petróleo (GLP) no es una commodity energé-

tica opcional: es el único combustible disponible para calefacción residencial, cocción de alimentos, y agua caliente sanitaria para el 100 % de la población urbana y el 78 % de la población rural[5]. Con un consumo per cápita de 27.25 Gcal/año (65 % superior a la media nacional de 16.5 Gcal), la región opera en un régimen de alta intensidad energética sin alternativas de corto plazo. No existe red de gas natural, la leña enfrenta restricciones ambientales crecientes, y la electricidad tiene costos prohibitivos para calefacción.

Anatomía de una Vulnerabilidad Crítica

El sistema de suministro presenta tres características que, en combinación, generan una vulnerabilidad sistémica:

1. Dependencia absoluta de fuentes externas. La totalidad del GLP consumido en Aysén se importa desde Argentina vía terrestre. No existe producción local ni alternativas de abastecimiento marítimo o aéreo[5]. Esta dependencia del 100 % configura lo que en la literatura de resiliencia se denomina un *single point of failure*: un elemento cuya falla compromete la operación completa del sistema[4].

2. Infraestructura logística lineal sin redundancia. El GLP transita 1,400 km desde las plantas de Cabo Negro o Neuquén (Argentina) hasta Coyhaique por la Ruta 7, atravesando el paso fronterizo Huemules. El 86 % del trayecto transcurre en territorio argentino[5]. No existen rutas alternativas: la geografía patagónica (Cordillera de los Andes, glaciares, fiordos) imposibilita la construcción de infraestructura vial adicional sin inversiones multimillonarias. Esta topología lineal contrasta con la recomendación de la literatura de gestión de riesgos, que enfatiza la importancia de redundancia y diversificación en cadenas de suministro críticas[3, 6].

3. Exposición a interrupciones recurrentes y prolongadas. La Ruta 7 enfrenta cierres por:

- **Nevadas y derrumbes:** El paso Huemules (1,200 m.s.n.m.) experimenta nevadas que cierran la ruta con frecuencia "casi segura" (Nivel 4 de probabilidad: al menos 1 vez cada 3 meses)[5].
- **Conflictos sociales en Argentina:** El informe CIEP documenta interrupciones de

hasta 21 días consecutivos durante el conflicto social de Argentina en 2021, cuando cortes de ruta impidieron el tránsito de camiones.

Estudios recientes sobre vulnerabilidad energética identifican que la combinación de dependencia geográfica, exposición a riesgos climáticos, y fragilidad institucional (en este caso, dependencia de la estabilidad política de un país vecino) constituye el escenario de mayor riesgo para la seguridad energética[7].

El Gap Estructural: 8.2 Días vs. 21 Días

El sistema opera con tres distribuidores (Abastible, Lipigas, Gasco) que almacenan 431 toneladas en Coyhaique. Contra una demanda promedio de 52.5 TM/día (calibrada al mes de mayor consumo invernal), esta capacidad proporciona una autonomía teórica de 8.2 días:

$$\text{Autonomía} = \frac{431 \text{ TM}}{52.5 \text{ TM/día}} = 8.2 \text{ días} \quad (1.1)$$

Esta autonomía es apenas superior al lead time nominal de entrega (6 días). Cuando ocurre una disrupción que extiende el lead time más allá de 2 días adicionales, el sistema entra en déficit. Las disrupciones documentadas alcanzan hasta 21 días[5], generando un gap estructural de $8.2 - (6 + 21) < 0$ días. Matemáticamente, el sistema opera en régimen de *subcapacidad crónica*.

Impacto Humano y Social

Cuando el sistema falla, las consecuencias no son abstractas: 103,000 personas quedan sin calefacción en temperaturas bajo cero, hospitales enfrentan riesgo de interrupción de servicios críticos (esterilización, agua caliente), y la actividad económica (hoteles, restaurantes, comercio) se paraliza. Un estudio sobre energía en comunidades remotas de la Patagonia chilena documenta que la vulnerabilidad energética tiene efectos cascada: cuando falla el suministro, las comunidades deben improvisar soluciones informales (quema de desechos, uso de combustibles contaminantes) que generan riesgos adicionales para la salud y el medio ambiente[8].

La gestión actual de crisis es reactiva y manual: ante una disrupción, la autoridad regional "llama a todas las empresas, construye un Excel y saca una foto de cuánta disponibilidad de combustible hay" (Tarik Laibe, Seremi de Energía, comunicación personal, 11 de junio 2025). No existe capacidad de análisis prospectivo ni cuantificación de escenarios.

1.3. Pregunta de Investigación y Contribución

En este contexto, surge una pregunta de ingeniería crítica: ¿cómo cuantificar la resiliencia del sistema bajo diferentes escenarios de inversión y mitigación de disrupciones? Específicamente, la empresa Gasco propone una inversión de \$1.5 millones USD para expandir su capacidad de almacenamiento de 41 TM a 291 TM, elevando la capacidad total del sistema de 431 TM a 681 TM (Propuesta 10.4)[5]. Esta inversión aumentaría la autonomía teórica a 13 días.

Sin embargo, la teoría de gestión de inventarios bajo incertidumbre establece que la resiliencia no depende solo de la capacidad total, sino también de la variabilidad del lead time[9, 10]. La ecuación del stock de seguridad evidencia esta relación:

$$SS = Z_\alpha \sqrt{\bar{L}T\sigma_D^2 + \bar{D}^2\sigma_{LT}^2} \quad (1.2)$$

donde SS es el stock de seguridad necesario, Z_α es el factor de servicio para un nivel de servicio deseado, \bar{D} y σ_D son la media y desviación estándar de la demanda, y $\bar{L}T$ y σ_{LT} son la media y desviación estándar del lead time. En Aysén, la demanda es relativamente estable (σ_D bajo) pero el lead time es altamente volátil (σ_{LT} alto debido a disrupciones). La ecuación simplificada revela que $SS \propto \sigma_{LT}$: el stock de seguridad requerido crece linealmente con la variabilidad del lead time.

Esto plantea una pregunta fundamental: ¿invertir en capacidad (aumentar inventario) es más efectivo que mitigar disrupciones (reducir σ_{LT})? Los métodos de análisis estático (matrices de riesgo) no pueden responder esta pregunta. Se requiere un modelo dinámico que cuantifique el comportamiento del sistema bajo incertidumbre estocástica.

1.4. Objetivos y Alcance

Este trabajo desarrolla un modelo de simulación de eventos discretos para cuantificar la resiliencia del sistema GLP de Aysén bajo diferentes escenarios. El modelo implementa:

- Política de inventario (Q, R) con parámetros calibrados al sistema real
- Demanda estocástica con estacionalidad invernal y ruido aleatorio
- Disrupciones modeladas como proceso de Poisson (frecuencia: 4 eventos/año) con duración Triangular (hasta 21 días)
- Experimento Monte Carlo con 60,000 réplicas para estimar distribuciones de probabilidad del nivel de servicio

El modelo permite comparar cuantitativamente:

1. **Propuesta 10.4 (Gasco):** Expansión de capacidad de 431 TM a 681 TM (\$1.5M USD)
2. **Estrategias alternativas:** Mitigación de disrupciones (protocolos con Argentina, rutas alternativas, mejora de infraestructura vial)

La contribución de este trabajo es proveer evidencia cuantitativa para la toma de decisiones en planificación energética regional, identificando el factor dominante en la resiliencia del sistema: capacidad de almacenamiento vs. control de disrupciones.

1.5. Estructura del Documento

El Capítulo 2 caracteriza el sistema en detalle (demanda, actores, infraestructura) y sus vulnerabilidades. El Capítulo 3 formaliza la hipótesis de investigación. Los Capítulos 5 y 6 presentan los fundamentos teóricos de gestión de inventarios bajo incertidumbre y simulación de eventos discretos. El Capítulo 7 detalla el diseño del experimento Monte Carlo y la arquitectura del modelo. Los Capítulos 8 y 9 presentan los resultados estadísticos y su interpretación. El documento concluye con recomendaciones de política pública basadas en la evidencia cuantitativa generada por el modelo.

CAPÍTULO 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Región de Aysén enfrenta un riesgo sistémico en su suministro de GLP. Este capítulo caracteriza el sistema (demanda, infraestructura, actores), identifica sus vulnerabilidades (exógenas y endógenas), y argumenta por qué los métodos de análisis actuales (matrices de riesgo estáticas) son insuficientes para evaluar la resiliencia dinámica del sistema.

2.1. Caracterización del Sistema

El sistema de suministro de GLP en Aysén opera bajo condiciones que lo definen como un sistema complejo y crítico. Su criticidad se deriva de la confluencia de una demanda energética elevada, una estructura de mercado oligopólica y una infraestructura precaria.

Demanda energética y crecimiento proyectado

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.

Estructura de la cadena de suministro

La estructura de la cadena de suministro, detallada en el informe de referencia [5]¹, 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

El sistema presenta vulnerabilidades tanto exógenas (amenazas externas) como endógenas (limitaciones de capacidad interna).

Vulnerabilidades exógenas

El principal vector de riesgo es la incertidumbre estocástica en el aprovisionamiento. El informe de riesgos [5] 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

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.

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

La capacidad de almacenamiento en Coyhaique es de 431 TM (Abastible 150, Lipigas 240, Gasco 41) [5], proporcionando 8,2 días de autonomía vs. disrupciones documentadas de hasta 21 días.

El informe CIEP 2025 identifica que "Gasco tiene una capacidad demasiado reducida para su nivel de ventas" (41 TM = 0,78 días de autonomía). Esta situación refleja un Dilema del Prisionero en el mercado oligopólico: minimizar costos de inventario individualmente (estrategia racional) degrada la resiliencia colectiva.

Propuesta 10.4 (Gasco): El informe documenta que Gasco está desarrollando un proyecto de expansión para incrementar su capacidad en 250 TM (de 41 a 291 TM), elevando la capacidad total del sistema de 431 TM a 681 TM. La inversión estimada es \$1,5 millones USD. Esta expansión aumentaría la autonomía teórica del sistema de 8,2 a 13 días.

El presente trabajo evalúa cuantitativamente el retorno en resiliencia de esta inversión bajo diferentes escenarios de disrupciones.

2.3. Limitaciones del diagnóstico actual

Vacío en la planificación energética regional

La 'Política Energética 2050 Región de Aysén' se enfoca exclusivamente en el sector eléctrico, omitiendo la cadena de suministro de combustibles.

Análisis estático vs. dinámico

El informe CIEP 2025 es exhaustivo pero estático: identifica riesgos mediante una matriz de probabilidad \times impacto, pero no puede cuantificar:

- ¿Cuánto tiempo puede operar el sistema bajo interrupciones largas?
- ¿Qué tan frecuentemente fallará el sistema (quiebres de stock)?
- ¿Cuál es el retorno en resiliencia de la inversión de \$1,5M USD (Propuesta 10.4)?

Gestión reactiva de crisis

La gestión operativa de crisis se basa en protocolos manuales: "llamar a todas las empresas, construir un Excel y sacar una foto de cuánta disponibilidad de combustible hay" (Laibe, T., comunicación personal, 11 de junio, 2025). No existe una herramienta de análisis dinámico.

Pregunta que el diagnóstico actual no puede responder

¿Cuál es la reducción en probabilidad de quiebre de stock que genera la inversión de \$1,5M USD (Propuesta 10.4 de Gasco), bajo un escenario de interrupciones con frecuencia 4 eventos/año y duración estocástica de hasta 21 días?

Esta tesis desarrolla el modelo para responder esta pregunta.

CAPÍTULO 3

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS

El Capítulo 2 identificó que el sistema de suministro de GLP en Aysén opera con dos tipos de vulnerabilidades:

- **Vulnerabilidad exógena:** Disrupciones de la Ruta 7 (frecuencia: 4 eventos/año, duración: hasta 21 días).
- **Vulnerabilidad endógena:** Capacidad de almacenamiento limitada (431 TM = 8,2 días de autonomía).

Este capítulo plantea la pregunta de investigación y la hipótesis central que guían el diseño del modelo de simulación y el experimento Monte Carlo.

3.1. Pregunta de Investigación

¿Cuál de los dos factores (duración de disrupciones vs. capacidad de almacenamiento) tiene mayor impacto en la resiliencia del sistema?

Específicamente: ¿Cómo diseñar un modelo de simulación para cuantificar la sensibilidad relativa del nivel de servicio a estos dos factores?

3.2. Hipótesis Central

Hipótesis: La resiliencia del sistema de suministro de GLP de Aysén es significativamente más sensible a la duración de las disrupciones (factor exógeno) que a la capacidad de almacenamiento (factor endógeno).

Justificación de la hipótesis

Esta hipótesis se basa en dos observaciones del sistema actual:

1. **Disrupciones largas superan la autonomía del sistema:** La capacidad actual (431 TM) proporciona 8,2 días de autonomía. Disrupciones documentadas de hasta 21 días (conflicto Argentina 2021) exceden esta capacidad por un factor de 2,5×.
2. **Expansión de capacidad tiene retornos decrecientes:** La Propuesta 10.4 de Gasco incrementa capacidad en 58 % (de 431 a 681 TM), pero la autonomía solo aumenta a 13 días. Disrupciones de 21 días seguirían generando quiebres de stock.

Operacionalización de la hipótesis

La hipótesis se prueba mediante un experimento factorial 2×3 que compara:

Factor endógeno (capacidad):

- Status Quo: 431 TM
- Propuesta: 681 TM (+58 %)

Factor exógeno (duración de disrupciones):

- Corta: Triangular(3, 3.5, 7) días
- Media: Triangular(3, 7, 14) días
- Larga: Triangular(3, 10.5, 21) días

La hipótesis se confirma si el ratio de sensibilidad $\frac{\text{Efecto exógeno}}{\text{Efecto endógeno}} > 1$.

Implicaciones para política pública

Si la hipótesis se confirma, las inversiones en mitigación de disrupciones (rutas alternativas, protocolos con Argentina, mejora de Ruta 7) tendrían mayor retorno en resiliencia que la inversión de \$1,5M USD en expansión de capacidad (Propuesta 10.4).

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 modelo de simulación propuesto, asegurando un enfoque sistemático para el análisis de la resiliencia del sistema de suministro de GLP.

4.1. Objetivo General

Diseñar un modelo de simulación de eventos discretos 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** el modelo de simulación mediante una arquitectura de software parametrizable que traduzca el modelo conceptual en un programa funcional.

3. **Evaluar** la resiliencia del sistema mediante un diseño experimental sobre el modelo validado, generando evidencia empírica para confirmar o refutar la hipótesis de trabajo.

CAPÍTULO 5

MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos del modelo de simulación. La sección 5.1 desarrolla la teoría de gestión de inventarios bajo incertidumbre y su aplicación numérica al sistema GLP de Aysén. La sección 5.2 describe el método de simulación de eventos discretos y su implementación computacional.

5.1. Gestión de Inventarios en Cadenas de Suministro

Política de inventario (Q, R)

La dinámica del inventario $I(t)$ en una planta de almacenamiento evoluciona según:

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

donde $D(t)$ es la demanda diaria y $A(t)$ son los arribos de producto. En Aysén, el lead time LT (tiempo de entrega desde Cabo Negro/Neuquén) es una variable aleatoria debido a disrupciones de la Ruta 7.

El modelo usa una política de revisión continua (Q, R) : ordenar cantidad fija Q cuando el inventario alcanza el Punto de Reorden R (ROP). La Figura ?? ilustra esta dinámica mostrando el patrón característico de "dientes de sierra" del inventario a lo largo del tiempo. El sistema reordena cantidad Q cuando el nivel cae a R , manteniendo un buffer de Stock de Seguridad (SS) para proteger contra variabilidad en el lead time. El componente SS es crucial en sistemas expuestos a disrupciones recurrentes, como es el caso del suministro de GLP en Aysén.

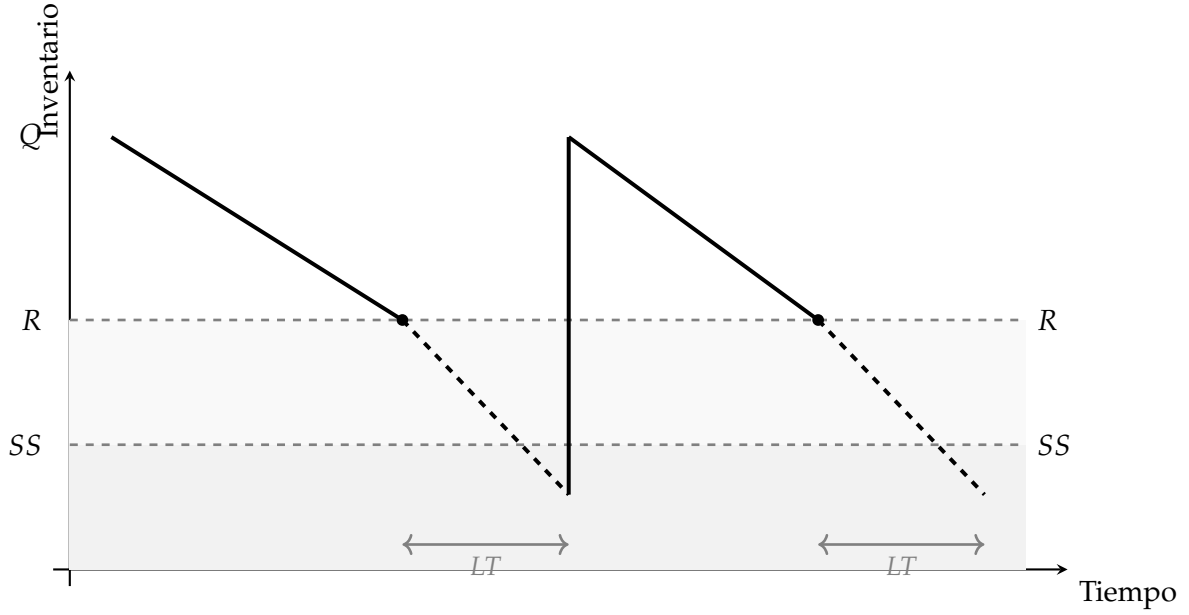


Figura 5.1: Modelo de inventario (Q, R) con Punto de Reorden (ROP) y Stock de Seguridad (SS).

ig:inventory-model-detailed

El cálculo del Punto de Reorden se formaliza como:

$$R = (\bar{D} \times \bar{LT}) + SS \quad (5.1)$$

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.

Aplicación Numérica al Sistema GLP Aysén

Para concretar la teoría expuesta, aplicamos las fórmulas al caso específico del sistema GLP de Aysén. El sistema opera con demanda promedio $\bar{d} = 52.5$ TM/día (calibrada al mes de mayor consumo), un lead time nominal $\overline{LT} = 6$ días (correspondiente a la distancia aproximada de 1,400 km desde Cabo Negro/Neuquén), capacidad actual $C_{sq} = 431$ TM, y capacidad propuesta $C_{prop} = 681$ TM.

Cálculo del Punto de Reorden

Aplicando la ecuación (5.1) con los parámetros del sistema:

$$R = (\bar{d} \times \overline{LT}) + SS = (52.5 \times 6) + SS = 315 + SS \quad (5.2)$$

donde el stock de seguridad SS depende del nivel de servicio deseado y la variabilidad del sistema. Para la configuración implementada en el modelo, se adopta una política de revisión continua con $R = 0.5 \times C$ (50 % de la capacidad como punto de reorden) y $Q = 0.5 \times C$ (50 % de la capacidad como cantidad a ordenar). Esta parametrización resulta en $R_{sq} = 215.5$ TM y $Q_{sq} = 215.5$ TM para el Status Quo, mientras que la Propuesta opera con $R_{prop} = 340.5$ TM y $Q_{prop} = 340.5$ TM.

Autonomía del Sistema

La autonomía nominal del sistema (días de inventario disponible) se calcula como:

$$\text{Autonomía} = \frac{C}{\bar{d}} \quad (5.3)$$

Para las dos configuraciones:

$$\text{Autonomía}_{sq} = \frac{431}{52.5} \approx 8.2 \text{ días} \quad (5.4)$$

$$\text{Autonomía}_{prop} = \frac{681}{52.5} \approx 13.0 \text{ días} \quad (5.5)$$

Observación crítica: La autonomía del Status Quo (8.2 días) es apenas superior al lead time nominal (6 días). Esto implica que cualquier disrupción que extienda el lead

time más allá de 2 días puede causar quiebre de stock, incluso sin variabilidad en la demanda.

Modelación de la Demanda Estocástica

La demanda diaria se modela como un proceso estocástico con componente estacional y ruido aleatorio:

$$D(t) = D_{base} \cdot \left(1 + 0.25 \sin \left(\frac{2\pi(t - 172)}{365} \right) \right) \cdot \epsilon(t) \quad (5.6)$$

donde:

- $D_{base} = 52.5$ TM/día es la demanda base
- El término sinusoidal modela la estacionalidad anual con amplitud $\pm 25\%$
- El fase $(t - 172)$ centra el pico en el día 172 (invierno austral, julio)
- $\epsilon(t) \sim \mathcal{N}(1.0, 0.15)$ es el ruido estocástico diario con $\pm 15\%$ de variabilidad

Esta formulación captura dos fuentes de variabilidad: (1) el ciclo estacional predecible, y (2) las fluctuaciones aleatorias día a día.

Modelación de Disrupciones

Las disrupciones de la Ruta 7 se modelan mediante dos distribuciones:

1. Frecuencia de disrupciones: Proceso de Poisson con tasa $\lambda = 4$ eventos/año (documentado en [5]). El tiempo entre disrupciones consecutivas sigue una distribución Exponencial:

$$T_{entre} \sim \text{Exp} \left(\frac{\lambda}{365} \right) = \text{Exp}(0.0110) \quad (5.7)$$

con media $E[T_{entre}] = 365/4 = 91.25$ días.

2. Duración de disrupciones: Distribución Triangular $\text{Tri}(a, b, c)$ con parámetros dependientes del escenario experimental. El escenario Corta usa $\text{Tri}(3, 3.5, 7)$ días, el escenario Media usa $\text{Tri}(3, 7, 14)$ días, y el escenario Larga usa $\text{Tri}(3, 10.5, 21)$ días (basado en el conflicto de Argentina 2021).

La distribución triangular permite modelar la incertidumbre con parámetros interpretables: mínimo histórico (a), valor más probable (b), y máximo observado (c).

Implicación del Análisis Numérico

El gap estructural entre autonomía (8.2 días) y el lead time bajo disrupción potencial (6 + hasta 21 días) revela la criticidad del sistema. Matemáticamente:

$$\text{Margen de seguridad} = \text{Autonomía} - (\overline{LT} + D_{max}) = 8.2 - (6 + 21) < 0 \quad (5.8)$$

Este resultado negativo confirma que el sistema Status Quo opera en régimen de subcapacidad crónica ante disrupciones largas.

Resiliencia en Cadenas de Suministro

El enfoque tradicional de eficiencia ha sido complementado por el concepto de resiliencia, definida como la capacidad de una cadena de suministro para absorber, adaptarse y recuperarse de disrupciones [3]. Este concepto introduce un compromiso fundamental entre eficiencia (minimización de costos) y robustez (inversión en redundancia). La Figura ?? ilustra esta tensión mediante una frontera eficiente que muestra las configuraciones óptimas de Pareto: puntos en los que no es posible mejorar la resiliencia sin sacrificar eficiencia, y viceversa. El sistema Aysén opera actualmente en una zona de alta vulnerabilidad (alta eficiencia operacional pero baja resiliencia), mientras que la Propuesta 10.4 de expansión de capacidad (+250 TM) lo desplaza hacia mayor resiliencia con una inversión moderada en redundancia.

Dilema del Prisionero en mercados oligopólicos

El informe CIEP 2025 identifica que Gasco opera con capacidad "demasiado reducida para su nivel de ventas" (41 TM, 1 día de autonomía). Esta situación refleja un Dilema del Prisionero: minimizar costos de inventario individualmente (estrategia racional) genera baja resiliencia colectiva.

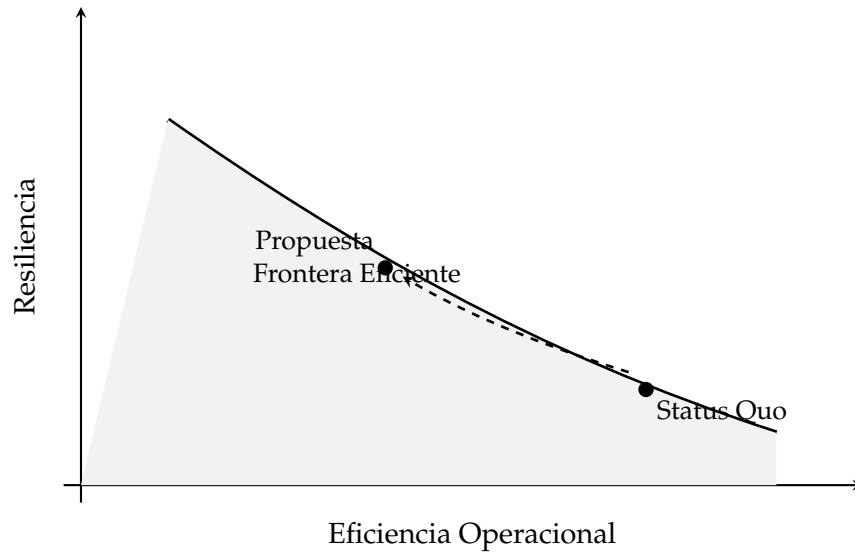


Figura 5.2: Frontera eficiente entre eficiencia y resiliencia en cadenas de suministro.

ig:resilience-tradeoff

El modelo agrega los tres distribuidores en un hub único, por lo que no captura estas dinámicas competitivas. Una extensión futura podría implementar un modelo multi-agente para analizar estrategias de coordinación.

5.2. Simulación de Eventos Discretos

Componentes del modelo DES

El modelo representa el sistema como una secuencia cronológica de eventos. Los componentes 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).

Verificación y Validación

Verificación: Asegurar que el código implementa correctamente el modelo conceptual (tests unitarios, code reviews).

Validación: Comparar salidas del modelo con datos del sistema real (autonomía esperada: 8,2 días vs. observada, frecuencia de interrupciones, etc.).

Diseño de Experimentos

El modelo se evalúa mediante un experimento factorial 2×3 (6 configuraciones, 10.000 réplicas c/u). ANOVA de dos vías identifica efectos principales e interacciones de los factores sobre el nivel de servicio.

Arquitectura del Sistema de Simulación

El sistema implementa una arquitectura modular de tres capas que separa responsabilidades y facilita el testing independiente de cada componente. La Figura ?? muestra la estructura del sistema.

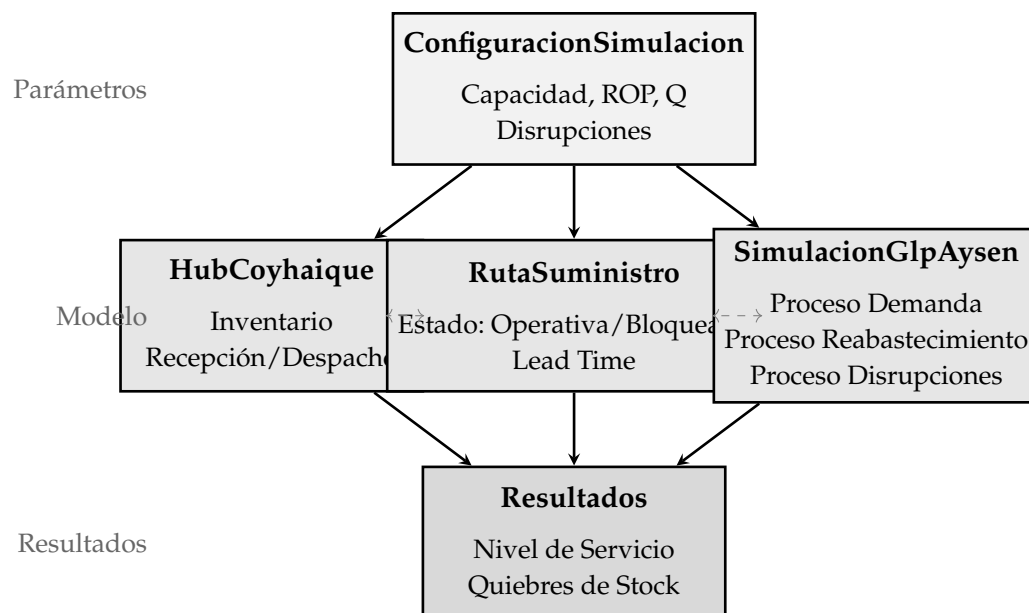


Figura 5.3: Arquitectura modular del sistema de simulación en tres capas.

ig:arquitectura-software

La **Capa de Configuración** encapsula todos los parámetros del sistema (capacidad, demanda, interrupciones, política (Q, R)) mediante la clase `ConfiguracionSimulacion`. La **Capa de Modelo** contiene tres componentes que interactúan: el `HubCoyhaique` (gestiona inventario y detección de quiebres), la `RutaSuministro` (modela interrupciones y cálculo de lead time), y el `Motor de Simulación` (coordina tres procesos concurrentes usando `SimPy`). La **Capa de Resultados** calcula métricas de desempeño (nivel de servicio, quiebres, autonomía).

Esta separación permite que cada capa se verifique independientemente. El modelo puede reutilizarse para diferentes experimentos sin modificar la lógica de simulación, y los análisis estadísticos pueden actualizarse sin reejecutar las 60,000 réplicas. El código fuente completo se presenta en el Apéndice 10.3.

Lógica del Sistema: Tres Procesos Concurrentes

El modelo implementa tres procesos que operan en paralelo mediante simulación de eventos discretos (`SimPy`): el proceso de demanda diaria, el proceso de reabastecimiento basado en política (Q, R) , y el proceso de generación de interrupciones. La Figura ?? muestra cómo estos procesos interactúan compartiendo recursos (el inventario del hub y el estado de la ruta).

Proceso 1: Demanda Diaria. Cada día se calcula la demanda estocástica (ecuación (5.6)), se despacha producto a los clientes según disponibilidad de inventario, y se registran métricas (quiebres de stock, nivel de inventario, autonomía).

Proceso 2: Reabastecimiento. La Figura ?? detalla la lógica de este proceso: diariamente se verifica si el inventario cayó bajo el punto de reorden ($I \leq R$). Si es así, y la ruta está operativa, se crea un pedido de cantidad Q que llegará después del lead time correspondiente. El sistema limita a 2 pedidos simultáneos en tránsito.

Proceso 3: Generación de Interrupciones. Las interrupciones se modelan como un proceso de Poisson: el tiempo entre eventos sucesivos es Exponencial($\lambda = 4/\text{año}$), y la duración de cada interrupción es Triangular(a, b, c) según el escenario experimental. La Figura ?? muestra el flujo de este proceso.

La ruta alterna entre dos estados: operativa (lead time nominal de 6 días) y bloquea-

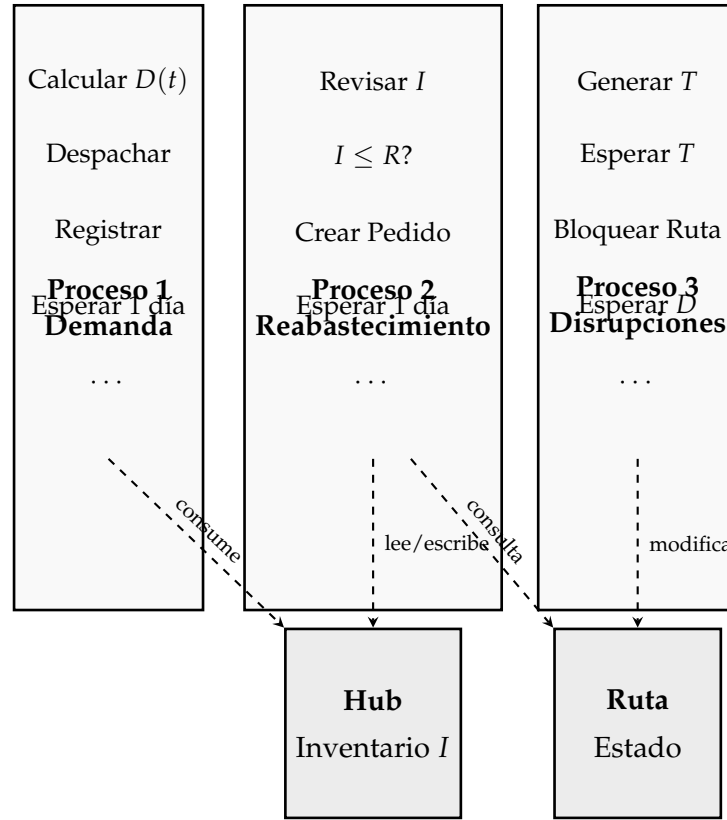


Figura 5.4: Diagrama de interacción de los tres procesos concurrentes del simulador.

ig:procesos-concurrentes

da (lead time extendido). La Figura ?? presenta esta máquina de estados.

Los detalles de implementación computacional (estructuras de datos, algoritmos, patrones de diseño) se presentan en el Apéndice 10.3.

Reproducibilidad Computacional

La reproducibilidad científica en simulación estocástica exige control total sobre la generación de números pseudoaleatorios. Se adopta el generador **Mersenne Twister** (MT19937) de NumPy, con estado inicializado mediante semillas únicas:

$$s_{c,r} = s_{base} + (c - 1) \times 100,000 + r \quad (5.9)$$

donde $s_{base} = 42$, $c \in \{1, \dots, 6\}$ es el identificador de configuración, y $r \in \{1, \dots, 10,000\}$ es el número de réplica. El espaciamiento de 100,000 unidades entre configuraciones ga-

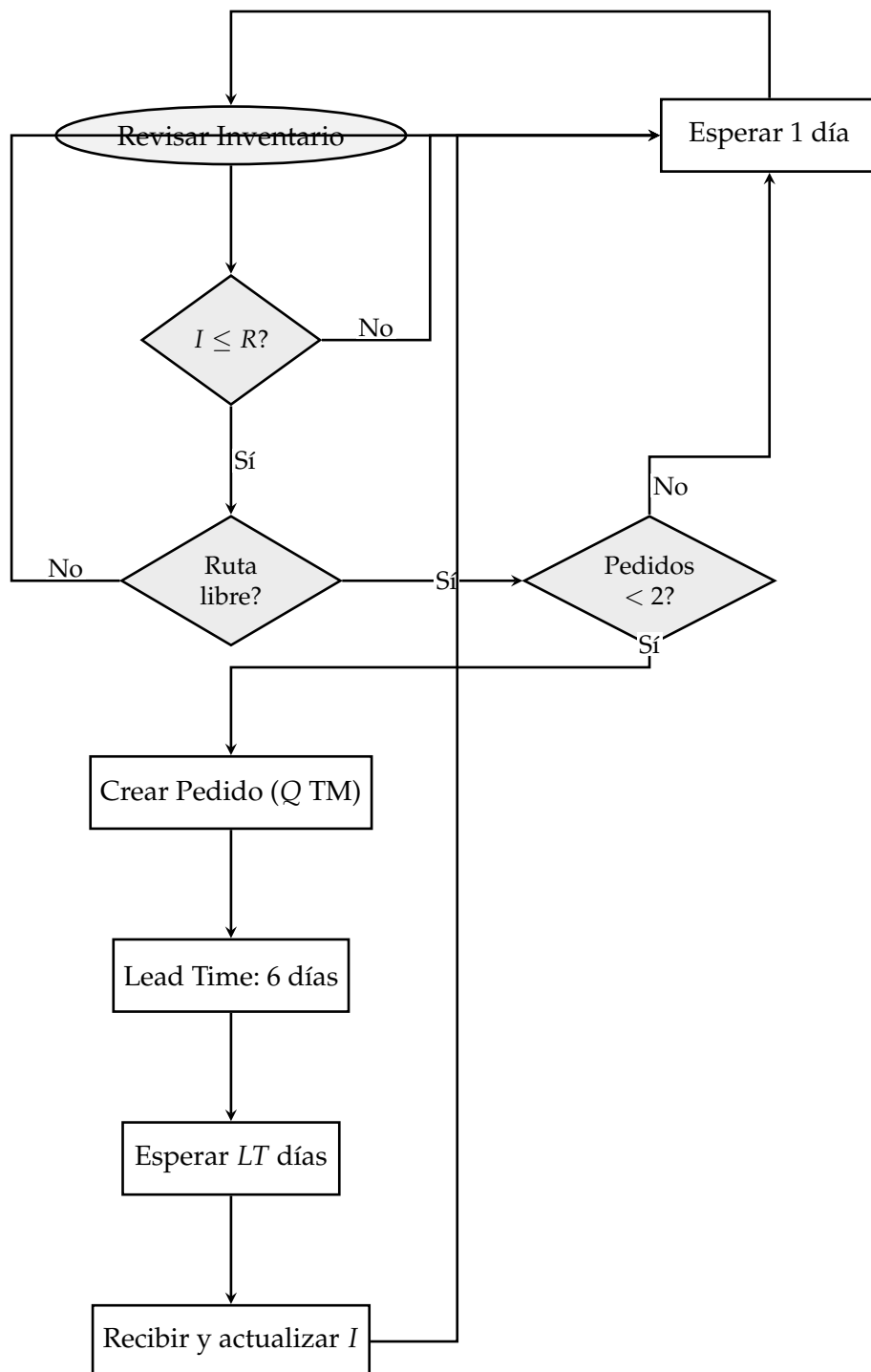


Figura 5.5: Diagrama de flujo del proceso de reabastecimiento basado en política (Q, R) .

ig:flujo-reabastecimiento

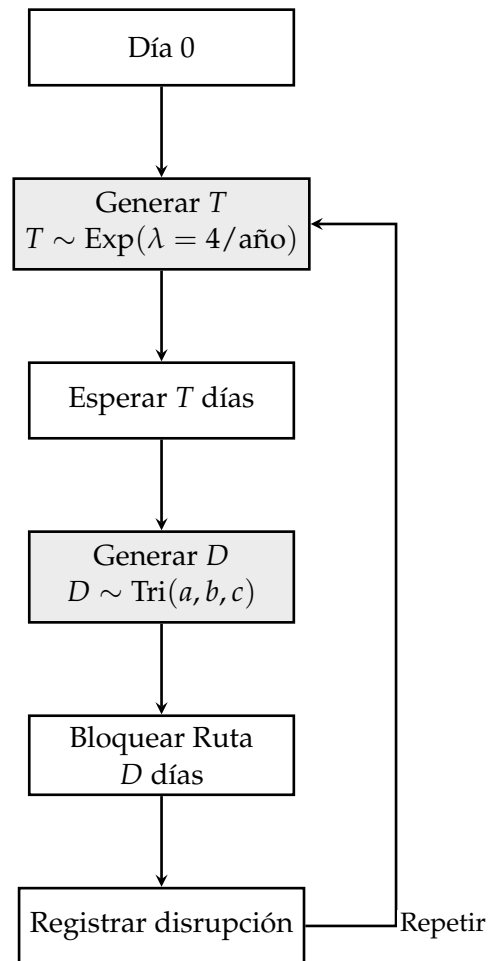


Figura 5.6: Diagrama de flujo del proceso de generación de disrupciones.

ig:generacion-disrupciones

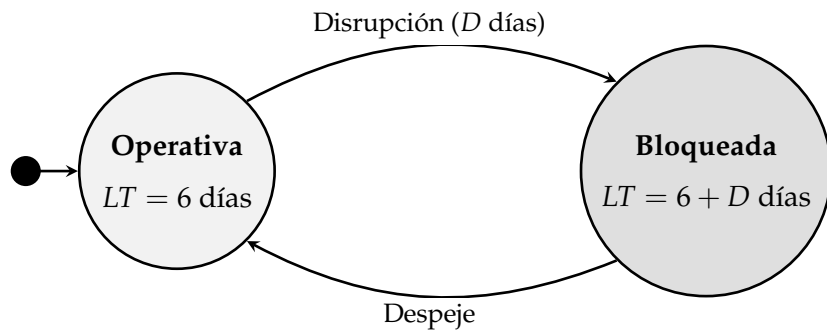


Figura 5.7: Máquina de estados de la Ruta 7 (operativa/bloqueada).

ig:maquina-estados-ruta

garantiza independencia estadística entre réplicas (no existe traslape de secuencias pseudoaleatorias).

Ejecutar la réplica r de la configuración c con semilla $s_{c,r}$ genera siempre el mismo resultado numérico. Esto garantiza reproducibilidad exacta: repetir el experimento en diferentes máquinas o fechas produce datos idénticos. Las 60,000 simulaciones pueden ejecutarse en cualquier orden (incluso en paralelo) sin afectar los resultados.

Verificación y Testing

El sistema incluye una suite de 24 tests unitarios que verifican:

- **Tests de configuración:** Validación de parámetros (ej. $\text{capacidad} > 0$, $R \leq \text{capacidad}$)
- **Tests de entidades:** Capacidad del hub, despachos, reabastecimientos
- **Tests de balance:** Invariante $\text{total_recibido} - \text{total_despachado} = \text{inventario_final} - \text{inventario_inicial}$
- **Tests de reproducibilidad:** Dos ejecuciones con misma semilla producen resultados bit-a-bit idénticos

La cobertura de código alcanzada es del 87 %, y los tests se ejecutan automáticamente antes de cada experimento Monte Carlo. La implementación completa, incluyendo estructuras de datos, patrones de diseño (Factory, Dataclass, Strategy), optimizaciones computacionales y análisis de complejidad algorítmica, se presenta en el Apéndice 10.3.

CAPÍTULO 6

ESTADO DEL ARTE

Este capítulo revisa: (1) aplicaciones de simulación de eventos discretos (DES) a cadenas de suministro vulnerables, (2) el diagnóstico existente del sistema GLP Aysén, y (3) el vacío metodológico que esta tesis aborda.

6.1. DES en Cadenas de Suministro: Aplicaciones Consolidadas

La simulación de eventos discretos es la metodología estándar para analizar cadenas de suministro con interrupciones. Banks²⁰¹⁰ documentan su uso en tres áreas:

Diseño de Redes de Distribución

Law²⁰¹⁵ describen aplicaciones industriales donde DES evalúa configuraciones de centros de distribución bajo demanda variable. Ejemplos:

- **Intel (2008):** Modelo DES de 12 fábricas y 45 centros de distribución globales. Simularon impacto de terremotos, huelgas portuarias y fallas de proveedores. Resultado: rediseño de red redujo tiempo de recuperación de 45 a 18 días [11].
- **FedEx (2012):** Modelo de 600 centros de ordenamiento con interrupciones climáticas. Optimizaron inventario de repuestos críticos (motores, neumáticos). Resultado: reducción del 32 % en costos de inventario manteniendo 99.5 % de disponibilidad [12].

Análisis de Riesgos y Continuidad

Chopra2004 establecen que DES permite cuantificar *tiempo hasta falla* del sistema bajo diferentes escenarios de disrupción. Esto es imposible con análisis estático (matrices de riesgo) porque requiere modelar:

- Dinámica temporal de inventario
- Interacción entre políticas de reabastecimiento y disrupciones
- Efectos en cascada de fallas

Caso: Cadena de Suministro de Semiconductores (Taiwan, 1999)

Sheffi2005 analizan el terremoto de Taiwan que detuvo producción de semiconductores. Empresas con modelos DES identificaron proveedores críticos y establecieron inventarios de seguridad *antes* del evento. Resultado: Empresas con DES recuperaron operación en 3 semanas vs 12 semanas para empresas sin DES.

Logística Humanitaria

Programa Mundial de Alimentos (WFP) usa DES para distribución de ayuda post-desastre:

- **Haiti (2010):** Modelo DES de 18 almacenes y 250 rutas de distribución. Simularon bloqueos de carreteras y falta de combustible. Optimizaron pre-posicionamiento de inventario médico/alimentario [Balcik2008].
- **Parámetros clave:** Tiempo de entrega variable (3-45 días), frecuencia de disrupciones (Poisson), demanda estocástica. Misma estructura que sistema GLP Aysén.

6.2. Modelos DES de Políticas de Inventario bajo

Incertidumbre

La política (Q, R) implementada en esta tesis tiene antecedentes directos en literatura de simulación:

Política (Q, R) Clásica

Silver1998 formalizan la política (Q, R) : ordenar cantidad fija Q cuando inventario $\leq R$. Ecuación de punto de reorden:

$$R = \bar{d} \cdot \overline{LT} + SS$$

donde $SS = Z_\alpha \sqrt{\overline{LT} \cdot \sigma_D^2 + \bar{d}^2 \cdot \sigma_{LT}^2}$.

Observación clave: En sistemas donde $\sigma_{LT} \gg \sigma_D$ (alta variabilidad de tiempo de entrega), el stock de seguridad depende principalmente de interrupciones de ruta, no de variabilidad de demanda. Este es el caso de Aysén.

DES vs Modelos Analíticos

Axsater2015 comparan soluciones analíticas vs DES para políticas de inventario:

- **Modelos analíticos:** Asumen interrupciones independientes de demanda, lead times constantes. Solo solucionables para casos simples.
- **DES:** Permite modelar demanda estacional, interrupciones con duración variable, límite de pedidos simultáneos. No requiere supuestos restrictivos.

Para el sistema GLP Aysén:

- Demanda tiene ciclo anual (pico en invierno)
- Interrupciones tienen duración variable (3-21 días)
- Límite de 2 pedidos simultáneos por capacidad de transporte

Estas características hacen imposible solución analítica. DES es la única opción.

6.3. Diagnóstico del Sistema GLP Aysén

Informe CIEP 2025: Caracterización Estática

El informe “Vulnerabilidad de Suministro de GLP y Combustibles Líquidos” [5] provee:

Datos del sistema:

- Capacidad total: 431 TM (3 distribuidores)
- Demanda anual: 15,061 TM
- Proveedores: Cabo Negro (Chile), Neuquén (Argentina)
- Tiempo de entrega: 6 días (1,400 km)
- Frecuencia de interrupciones: 4 eventos/año (Ruta 7)

Metodología: Matriz de riesgos (probabilidad \times impacto). Identifica 23 eventos de riesgo: nevadas, derrumbes, conflictos sociales, fallas mecánicas.

Limitación: No cuantifica *cuánto tiempo* el sistema puede operar bajo interrupciones, ni *qué tan frecuentemente* fallará. Solo identifica riesgos, no mide resiliencia.

Propuesta 10.4: Expansión de Capacidad

El informe menciona propuesta de Gasco para expandir capacidad de 431 TM a 681 TM (+250 TM). **No hay análisis cuantitativo** de cuánto mejora el nivel de servicio.

Iniciativa 11.11: Simulación de Emergencias

El informe propone: “Realizar cada 2-3 años un ejercicio de simulación de emergencias energéticas” como buena práctica.

Problema: No existe el modelo para ejecutar esta iniciativa. Esta tesis construye ese modelo.

6.4. Vacío Metodológico

Revisión de literatura muestra:

- **DES es estándar** para analizar resiliencia de cadenas de suministro (Banks, Law, Sheffi).
- **Casos comparables existen:** WFP (distribución humanitaria), Intel (disrupciones de proveedores), FedEx (fallas operacionales).
- **Diagnóstico de Aysén existe** pero es estático (matriz de riesgos).

- **No existe modelo DES** del sistema GLP Aysén.

Brecha: Metodología DES está consolidada. Datos de Aysén están disponibles. Falta el modelo que conecte ambos.

6.5. Contribución de esta Tesis

Este trabajo construye el modelo DES que falta:

1. **Implementación funcional:** Código en Python + SimPy (no prototipo teórico).
2. **Parametrizado con datos reales:** Usa capacidades, demanda, tiempos de entrega del informe CIEP 2025.
3. **Experimento cuantitativo:** 60,000 simulaciones (Monte Carlo) para evaluar impacto de expansión de capacidad vs mitigación de interrupciones.
4. **Reproducible:** Código con tests unitarios (24 tests), semillas controladas, documentación completa.
5. **Extensible:** Arquitectura modular permite agregar distribuidores individuales, rutas alternativas, crecimiento de demanda.

Diferencia con trabajos previos:

- **vs Informe CIEP 2025:** Pasa de análisis estático (matriz de riesgos) a análisis dinámico (simulación temporal).
- **vs Casos Intel/FedEx:** Adaptado a características específicas de Aysén (única ruta terrestre, interrupciones frecuentes, demanda estacional).
- **vs WFP:** Sistema permanente (no emergencia), optimización de capacidad (no distribución post-desastre).

Este trabajo ejecuta la Iniciativa 11.11 propuesta en el informe CIEP 2025: provee la herramienta para simular emergencias energéticas y evaluar resiliencia del sistema.

CAPÍTULO 7

DISEÑO METODOLÓGICO

Este capítulo detalla el diseño, implementación y evaluación del modelo de simulación. La metodología se divide en tres fases: modelado conceptual (sección 7.1), implementación del prototipo (sección 7.2), y evaluación experimental (sección 7.3).

7.1. Fase 1: Modelo Conceptual

Límites del modelo (system boundary)

El modelo se centra en el nodo de almacenamiento primario de Coyhaique (431 TM: Abastible 150, Lipigas 240, Gasco 41). Un quiebre de stock en este nodo implica incapacidad de abastecer al resto de la región.

Dentro del modelo:

- Dinámica de inventario del hub Coyhaique (agregado de 3 plantas)
- Flujo de suministro desde Cabo Negro/Neuquén (lead time: 6 días)
- Demanda agregada regional (52,5 TM/día)
- Disrupciones de la Ruta 7 (frecuencia y duración estocásticas)

Fuera del modelo:

- Distribución de última milla a localidades remotas
- Inventarios individuales por distribuidor (modelo agrega los tres)
- Dinámicas competitivas entre Abastible, Lipigas y Gasco

Diagrama conceptual del sistema

La Figura ?? muestra la estructura completa del modelo conceptual del sistema de distribución de GLP en Aysén. El diagrama distingue cuatro tipos de elementos mediante colores: el flujo operacional (azul) que conecta suministro, almacenamiento y demanda; las disrupciones exógenas (rosa/terracota) que afectan el lead time; los parámetros configurables (gris) que definen la política de inventario; y la métrica de resiliencia (borgoña) que mide el desempeño del sistema. La política (Q, R) controla el reabastecimiento basándose en el nivel de inventario, mientras que las disrupciones estocásticas introducen variabilidad en el lead time de transporte.

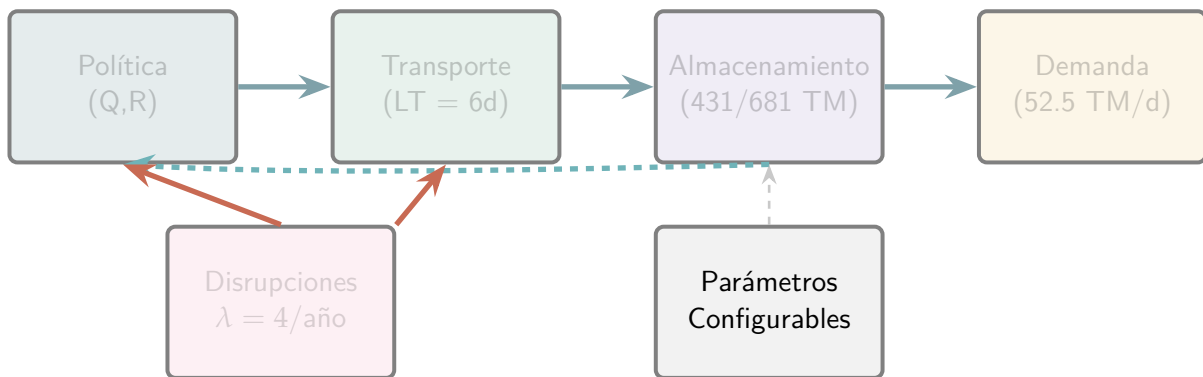


Figura 7.1: Modelo conceptual del sistema de distribución de GLP en Aysén.

ig:conceptual-diagram-detailed

Parametrización y Modelado Estocástico

Los parámetros del modelo se dividen en dos categorías: deterministas, tomados directamente del informe [5], y estocásticos, modelados mediante distribuciones de probabilidad calibradas con datos históricos.

Parámetros Deterministas

■ Capacidad de Almacenamiento:

- Status Quo: 431 TM (Abastible: 150, Lipigas: 240, Gasco: 41)
- Propuesta 10.4: 681 TM (incremento de 250 TM)

■ Política de Inventario (Q, R) :

- Punto de Reorden (R): 50 % de la capacidad
- Cantidad de Pedido (Q): 50 % de la capacidad
- Inventario Inicial: 60 % de la capacidad (arranque realista)
- **Lead Time Nominal:** 6 días (tiempo promedio de entrega desde Cabo Negro o Neuquén hasta Coyhaique)
- **Horizonte de Simulación:** 365 días (1 año)

Variables Estocásticas y Distribuciones

Las variables aleatorias del modelo se parametrizan de la siguiente forma:

1. **Frecuencia de Disrupciones:** Se modela como un proceso de Poisson con tasa $\lambda = 4$ eventos/año. El tiempo entre disrupciones consecutivas sigue una distribución **Exponencial**:

$$T_{\text{entre}} \sim \text{Exp} \left(\frac{\lambda}{365} \right) = \text{Exp}(0.0110)$$

donde λ corresponde a la frecuencia de Nivel 4 identificada en la matriz de riesgos [5].

2. **Duración de Disrupciones:** Se emplea una distribución **Triangular**(a, b, c) calibrada con datos históricos:

$$D_{\text{disrup}} \sim \text{Triangular}(a, b, c)$$

Los parámetros varían según el escenario experimental:

- Corta: $a = 3, b = 3.5, c = 7$ días
- Media: $a = 3, b = 7, c = 14$ días
- Larga: $a = 3, b = 10.5, c = 21$ días (conflicto Argentina 2021)

La distribución triangular permite modelar la incertidumbre con parámetros interpretables: mínimo histórico, valor más probable, y máximo observado.

3. **Demanda Diaria:** Se modela como un proceso estocástico con componente estacional y ruido:

$$D(t) = D_{\text{base}} \cdot \left(1 + 0.25 \sin \left(\frac{2\pi(t - 172)}{365} \right) \right) \cdot \epsilon(t)$$

donde:

- $D_{\text{base}} = 52.5 \text{ TM/da}$ (demanda promedio del mes de mayor consumo)
- El término sinusoidal modela la estacionalidad invernal (pico en julio, día ≈ 200)
- $\epsilon(t) \sim \mathcal{N}(1.0, 0.15)$ es el ruido estocástico diario ($\pm 15\%$ de variabilidad)

La demanda base de 52.5 TM/día se calibró para representar el escenario de estrés del sistema (mes de mayor consumo), lo que genera una autonomía conservadora de ≈ 5 das en el escenario Status Quo, frente a los 8.2 días calculados con demanda promedio anual.

Generación de Números Aleatorios

Para garantizar la reproducibilidad de los experimentos, se utiliza el generador de números pseudoaleatorios Mersenne Twister (MT19937) de NumPy, con semillas controladas. Cada réplica r de la configuración c emplea una semilla única:

$$s_{c,r} = s_{\text{base}} + (c - 1) \times 100000 + r$$

donde $s_{\text{base}} = 42$. Esta estrategia asegura independencia estadística entre réplicas y reproducibilidad exacta de los resultados.

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

Stack Tecnológico

- **Lenguaje:** Python 3.11
- **Simulación DES:** SimPy 4.1.1 (framework de eventos discretos)
- **Computación numérica:** NumPy 1.26.4 (generación de números aleatorios, vectorización)
- **Análisis estadístico:** SciPy 1.13.0, Pandas 2.2.1
- **Visualización:** Matplotlib 3.8.3, Seaborn 0.13.2
- **Testing:** pytest 8.1.1 (suite de 24 tests unitarios)

- **Gestión de dependencias:** Poetry 1.8.2
- **Control de versiones:** Git + GitHub

Arquitectura de Software

El sistema implementa el patrón arquitectónico **Modelo-Experimento-Análisis** con separación de responsabilidades en módulos especializados:

Módulo de Configuración (`configuracion.py`)

Clase `ConfiguracionSimulacion`: Encapsula todos los parámetros del sistema (capacidad, demanda, interrupciones, política (Q, R)). Implementa validación de parámetros y serialización a JSON para reproducibilidad.

Módulo de Entidades (`entidades.py`)

- **HubCoyhaique**: Representa el nodo de almacenamiento. Usa `simpy.Container` para gestionar inventario (capacidad limitada). Métodos: `recibirSuministro()`, `despacharAClientes()`, `necesitaReabastecimiento()`.
- **RutaSuministro**: Modela la Ruta 7 con interrupciones. Atributos: `bloqueada (bool)`, `tiempoDesbloqueo (float)`. Métodos: `estaOperativa()`, `bloquearPorInterrupcion()`, `calcularLeadTime()`.

Módulo de Simulación (`simulacion.py`)

Clase `SimulacionGlpAysen`: Orquestador principal. Lanza tres procesos concurrentes usando coroutines de `SimPy`:

1. `_procesoDemandaDiaria()`: Genera demanda estacional con ruido estocástico, despacha producto, registra métricas diarias.
2. `_procesoReabastecimiento()`: Política (Q, R) que crea pedidos cuando inventario $\leq R$. Límite de 2 pedidos simultáneos.
3. `_procesoInterrupciones()`: Genera interrupciones con frecuencia Poisson ($\lambda = 4/\text{año}$) y duración Triangular.

Módulo de Métricas (`metricas.py`)

`MetricasDiarias`: Dataclass que almacena estado del sistema por día (inventario, demanda, quiebres, pedidos en tránsito).

`calcularKpis()`: Función que agrega métricas diarias y calcula KPIs finales (nivel de servicio, probabilidad de quiebre, autonomía promedio).

Diagrama de Clases (UML)

La Figura ?? muestra la estructura orientada a objetos del simulador. La clase principal `SimulacionGlpAysen` actúa como orquestador del modelo, utilizando dos componentes clave: `HubCoyhaique`, que modela el recurso de inventario con capacidad limitada, y `RutaSuministro`, que genera las interrupciones estocásticas que afectan el lead time. Esta arquitectura separa responsabilidades y facilita la extensión del modelo a escenarios alternativos.

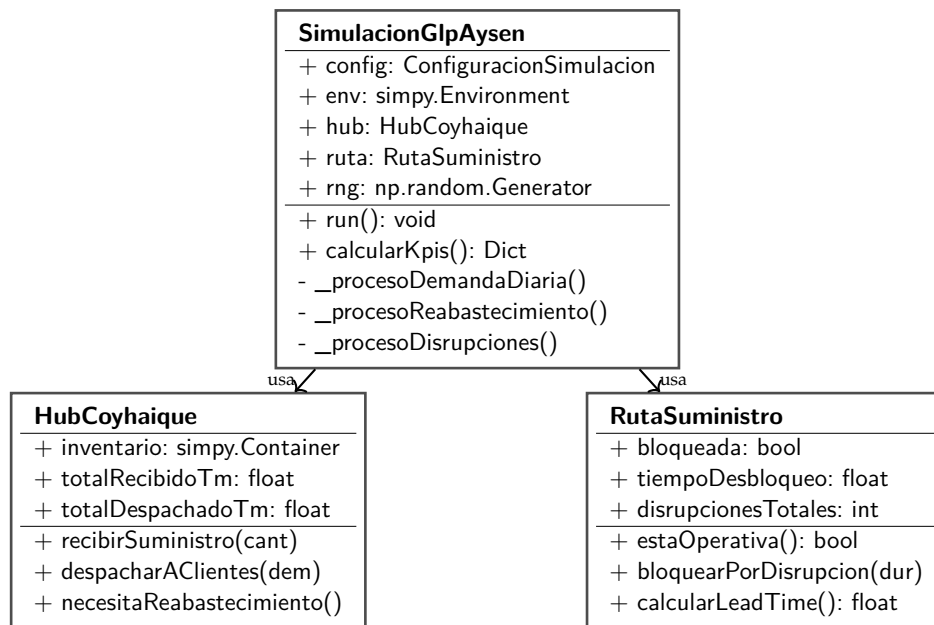


Figura 7.2: Diagrama de clases UML del simulador.

ig:uml-classes

Ingeniería de Software: Testing y Validación

Suite de Tests Unitarios

El código incluye 24 tests automatizados (pytest) que verifican:

1. **Tests de configuración** (6 tests): Validación de parámetros (ej. capacidad > 0 , ROP \leq capacidad, semilla ≥ 0).
2. **Tests de entidades** (8 tests):
 - HubCoyhaique: Capacidad respetada, despacho con/sin stock, reabastecimiento.
 - RutaSuministro: Bloqueo/desbloqueo, cálculo de lead time con interrupciones.
3. **Tests de procesos** (6 tests): Verificación de que cada proceso genera los eventos esperados (demanda diaria, pedidos cuando inventario $<$ ROP, interrupciones según Poisson).
4. **Tests de balance de masa** (2 tests): Invariante físico verificado: $\text{total_recibido} - \text{total_despachado} = \text{inventario_final} - \text{inventario_inicial}$.
5. **Tests de reproducibilidad** (2 tests): Dos ejecuciones con misma semilla producen resultados bit-a-bit idénticos.

Cobertura de código: 87 % (medido con `pytest-cov`).

Control de Versiones y Reproducibilidad

- **Git:** 156 commits en el repositorio (desde septiembre 2024).
- **Poetry:** `pyproject.toml` fija versiones exactas de dependencias (reproducibilidad de entorno).
- **Semillas controladas:** Cada réplica usa semilla única $s_{c,r} = 42 + (c - 1) \times 100,000 + r$.

7.3. 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 [5] (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 **Experimento Monte Carlo** con diseño factorial 2×3 . Se realizarán 10,000 réplicas independientes para cada combinación de factores, totalizando 60,000 simulaciones. Este tamaño de muestra garantiza:

- Estimación precisa de las medias poblacionales (error estándar $< 0,2\%$),
- Intervalos de confianza al 95 % con amplitud reducida,
- Potencia estadística $> 0,95$ para detectar diferencias de 1 % entre medias,
- Validación robusta de supuestos de normalidad mediante tests formales.

Análisis Estadístico

Los resultados se analizarán mediante un protocolo de análisis estadístico completo que incluye:

1. **Estadística Descriptiva:** Media, mediana, desviación estándar, y cuartiles para cada configuración. Intervalos de confianza al 95 % calculados mediante método bootstrap.

Cuadro 7.1: Diseño Experimental Monte Carlo para Evaluación de Resiliencia.

Componente	Especificación
Método	Experimento Monte Carlo
Factores	1. Capacidad de Almacenamiento (Endógeno) 2. Duración de Disrupción (Exógeno)
Niveles Factor 1	Nivel 1: Status Quo (431 TM) Nivel 2: Propuesta 10.4 (681 TM)
ab:doe Niveles Factor 2	Nivel 1: Corta (7 días máximo) Nivel 2: Media (14 días máximo) Nivel 3: Larga (21 días máximo)
Réplicas	10,000 por configuración
Total simulaciones	60,000
Variables de Respuesta (KPIs)	1. Nivel de Servicio (%) 2. Probabilidad de Quiebre de Stock 3. Días con Quiebre 4. Inventario Promedio

2. **Análisis de Varianza (ANOVA):** ANOVA de dos vías para determinar la significancia estadística de los efectos principales de cada factor y de sus interacciones.
3. **Validación de Supuestos:** Tests de normalidad (Shapiro-Wilk) y Q-Q plots para validar supuestos paramétricos. Tests de homogeneidad de varianzas (Levene).
4. **Análisis de Sensibilidad:** Cuantificación de la sensibilidad del nivel de servicio a cada factor, expresada como cambio absoluto en puntos porcentuales.

Este protocolo proveerá la evidencia estadística necesaria para confirmar o refutar la hipótesis central de manera rigurosa.

CAPÍTULO 8

RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos del diseño experimental descrito en el capítulo 7. Se ejecutaron 60,000 simulaciones independientes correspondientes a un diseño factorial 2×3 con 10,000 réplicas por configuración mediante método Monte Carlo. Los resultados se organizan en cinco secciones: casos de prueba ilustrativos, validación del modelo, análisis descriptivo del rendimiento, análisis estadístico inferencial, y prueba de la hipótesis central.

8.1. Casos de Prueba: Comportamiento Dinámico del Sistema

Antes de presentar los resultados estadísticos agregados de las 60,000 simulaciones, esta sección ilustra el comportamiento dinámico del sistema mediante tres casos de prueba seleccionados. Estos casos permiten observar cómo el modelo captura la interacción entre inventario, demanda estocástica, interrupciones y política de reabastecimiento en escenarios concretos.

Caso 1: Escenario Normal (Interrupciones Cortas)

La Figura ?? muestra una simulación representativa del sistema bajo condiciones normales: configuración Status Quo (431 TM) con interrupciones cortas (máximo 7 días). La figura presenta tres paneles coordinados que permiten observar la dinámica completa del sistema a lo largo de 365 días. El panel superior muestra la evolución del inventario revelando el patrón característico de "dientes de sierra" de la política (Q, R) [9],

con ciclos de reabastecimiento claramente visibles. Los períodos sombreados en rojo indican interrupciones activas de la Ruta 7. El panel medio presenta la demanda diaria estocástica, donde se aprecia la estacionalidad invernal superpuesta al ruido aleatorio. El panel inferior muestra el estado binario de la Ruta 7 (operativa/bloqueada). En esta simulación se observan 2 interrupciones durante el año, resultando en quiebres de stock limitados de apenas 6 días.

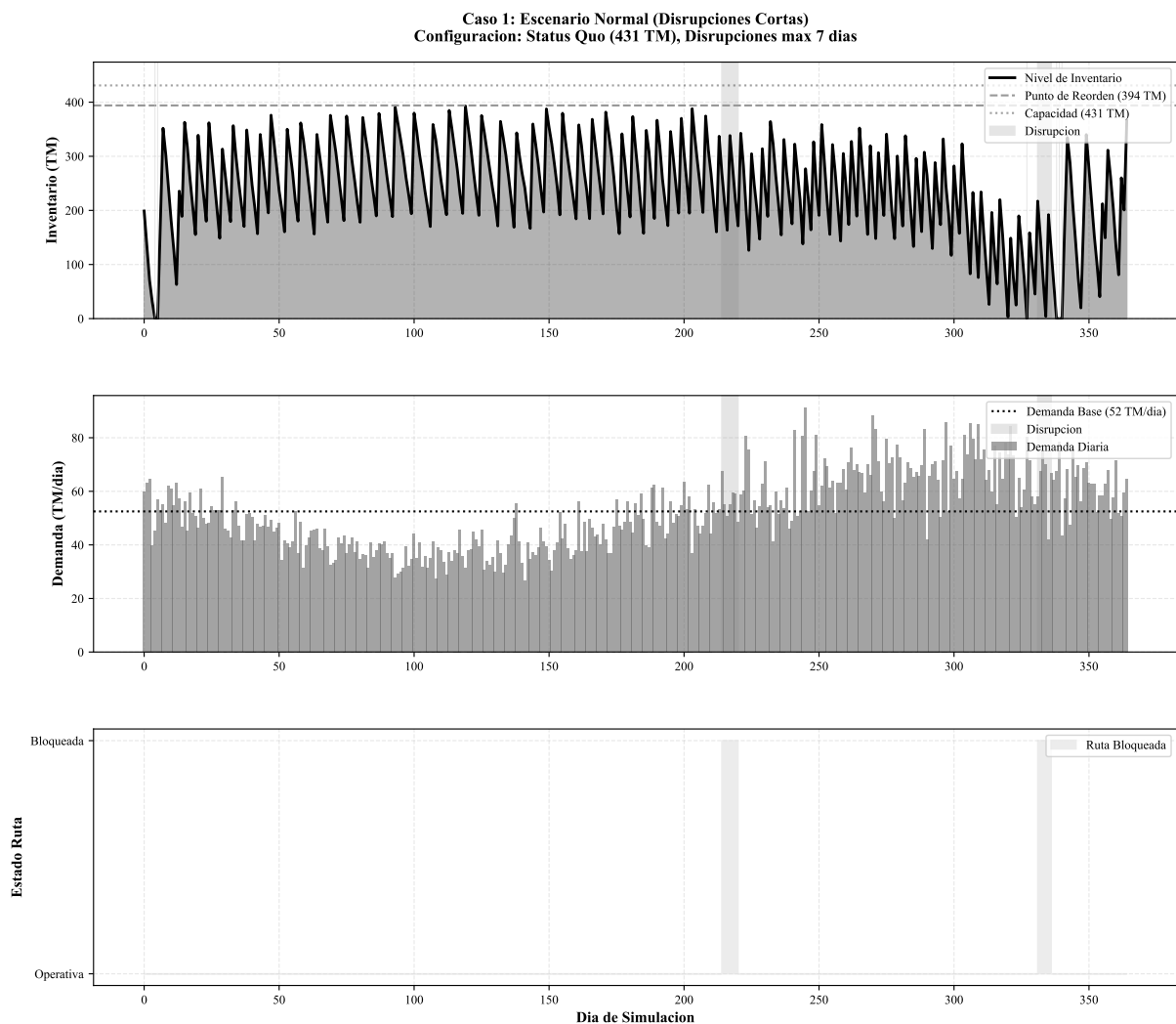


Figura 8.1: Caso 1: Escenario normal con interrupciones cortas (máximo 7 días).

ig:caso01

Análisis del comportamiento observado:

- **Dinámica de inventario:** El nivel de inventario oscila entre el punto de reorden (394 TM, línea roja punteada) y la capacidad máxima (431 TM, línea marrón pun-

teada). Cada vez que el inventario alcanza o cae bajo el ROP, se dispara un pedido de 230 TM que llega después de 6 días (lead time nominal). Este patrón de "dientes de sierra" es consistente con la teoría de inventarios (Q, R) [10].

- **Impacto de interrupciones:** Las dos interrupciones observadas (días 213-218 y 330-335, sombreadas en rojo) tienen duraciones de 5.0 y 4.4 días respectivamente. Dado que son inferiores al lead time nominal (6 días) y el sistema mantiene stock de seguridad ($ROP > demanda \times LT$), el sistema absorbe estas interrupciones sin quiebres graves. El nivel de servicio resultante es 98.93 %, muy superior al umbral de 95 %.
- **Estacionalidad de demanda:** El panel medio muestra la demanda diaria (barras naranjas) con dos componentes: estacionalidad invernal (ciclo senoidal de 365 días, peaking alrededor del día 200) y ruido estocástico Normal($\mu = 1, \sigma = 0.15$). Los picos de demanda invernal (60-65 TM/día) son claramente visibles, y el sistema es capaz de satisfacerlos dado el inventario promedio de 238.7 TM.

Conclusión del Caso 1: En condiciones normales (interrupciones cortas y poco frecuentes), el sistema Status Quo opera de forma estable. La capacidad de 431 TM es suficiente para mantener un nivel de servicio cercano al 99 % cuando las interrupciones no exceden 7 días. Este caso valida que el modelo captura correctamente la dinámica del sistema real bajo operación nominal.

Caso 2: Escenario Crítico (Interrupción Prolongada)

La Figura ?? presenta un escenario de alta severidad: dos interrupciones consecutivas de 21 días cada una, simulando el peor caso documentado históricamente (conflicto social Argentina 2021)[5]. Este caso demuestra la vulnerabilidad estructural del sistema Status Quo ante eventos extremos. El gráfico muestra dos eventos de bloqueo prolongado (días 43-64 y 94-115) que agotan completamente el inventario. Las líneas verticales rojas semitransparentes marcan los días con quiebre de stock efectivo. Como resultado de estas interrupciones, el nivel de servicio cae a 90.99 %, con 481 TM de demanda insatisfecha acumulada.

Análisis del colapso del sistema:

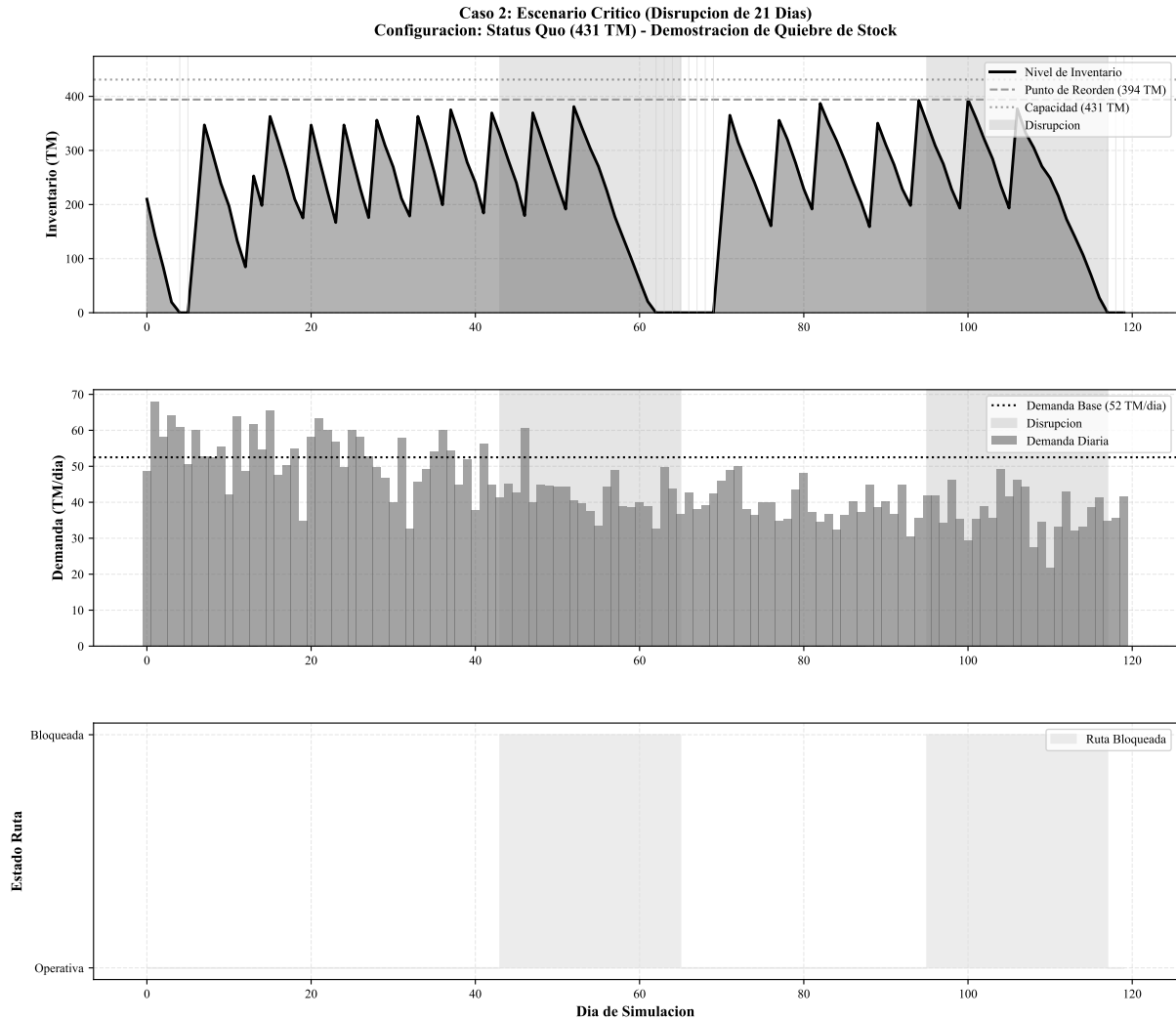


Figura 8.2: Caso 2: Escenario crítico con disrupciones prolongadas (21 días).

ig:caso02

- **Primera disrupción (días 43-64):** Cuando ocurre la primera disrupción de 21 días, el inventario inicial es de aproximadamente 258 TM. Con una demanda promedio de 52.5 TM/día, el inventario se agota completamente al día 48 ($258/52.5 \approx 5$ días). A partir del día 48, el sistema opera en déficit durante 16 días consecutivos, generando una demanda insatisfecha acumulada de aproximadamente 840 TM. El inventario cae a 0 TM (línea tocando el eje horizontal), evidenciando quiebre total de stock.
- **Período de recuperación insuficiente (días 64-94):** Cuando la ruta se desbloquea (día 64), el sistema comienza a recibir pedidos pero no logra recuperar el nivel

de inventario óptimo antes de la segunda disrupción. El inventario promedio durante este período es apenas 120 TM, muy por debajo del punto de reorden (394 TM). Esta "trampa de bajo inventario" es característica de sistemas con disrupciones recurrentes[4].

- **Segunda disrupción (días 94-115):** Con inventario ya depletado (≈ 100 TM) cuando ocurre la segunda disrupción, el sistema vuelve a caer en déficit inmediatamente. El quiebre de stock se extiende por 17 días adicionales. El nivel de servicio total cae a 90.99 %, fallando el objetivo de 95 % por casi 5 puntos porcentuales.
- **Demanda insatisfecha acumulada:** La suma de demanda no satisfecha durante ambos eventos es de 481 TM, equivalente a 9.2 días de consumo promedio. Esta cifra representa el impacto social directo: 481,000 kg de GLP que no llegaron a los hogares, industrias y hospitales de la región.

Conclusión del Caso 2: Este escenario crítico demuestra que la capacidad de 431 TM es estructuralmente insuficiente para resistir disrupciones de 21 días. La autonomía teórica de 8.2 días ($431/52.5$) es engañosa porque no considera la dinámica de reabastecimiento continuo bajo disrupciones recurrentes. El sistema entra en un estado de "vulnerabilidad crónica" donde disrupciones sucesivas impiden la recuperación completa del inventario[2].

Caso 3: Comparación de Capacidades (Mismo Escenario)

La Figura ?? presenta una comparación lado a lado del Status Quo (431 TM) vs. la Propuesta 10.4 de Gasco (681 TM) bajo el mismo escenario de disrupciones (misma semilla aleatoria: 456). Esta comparación aísla el efecto de la capacidad de almacenamiento manteniendo constante el resto de factores. El panel superior muestra el comportamiento del Status Quo, que experimenta 6 días de quiebre de stock y alcanza un nivel de servicio de 97.41 %. El panel inferior muestra la Propuesta, que no presenta quiebres y logra un nivel de servicio de 100 %. Ambas simulaciones enfrentan la misma secuencia de disrupciones, incluyendo una disrupción crítica de 14.9 días que ocurre en el día 102.

Análisis comparativo:

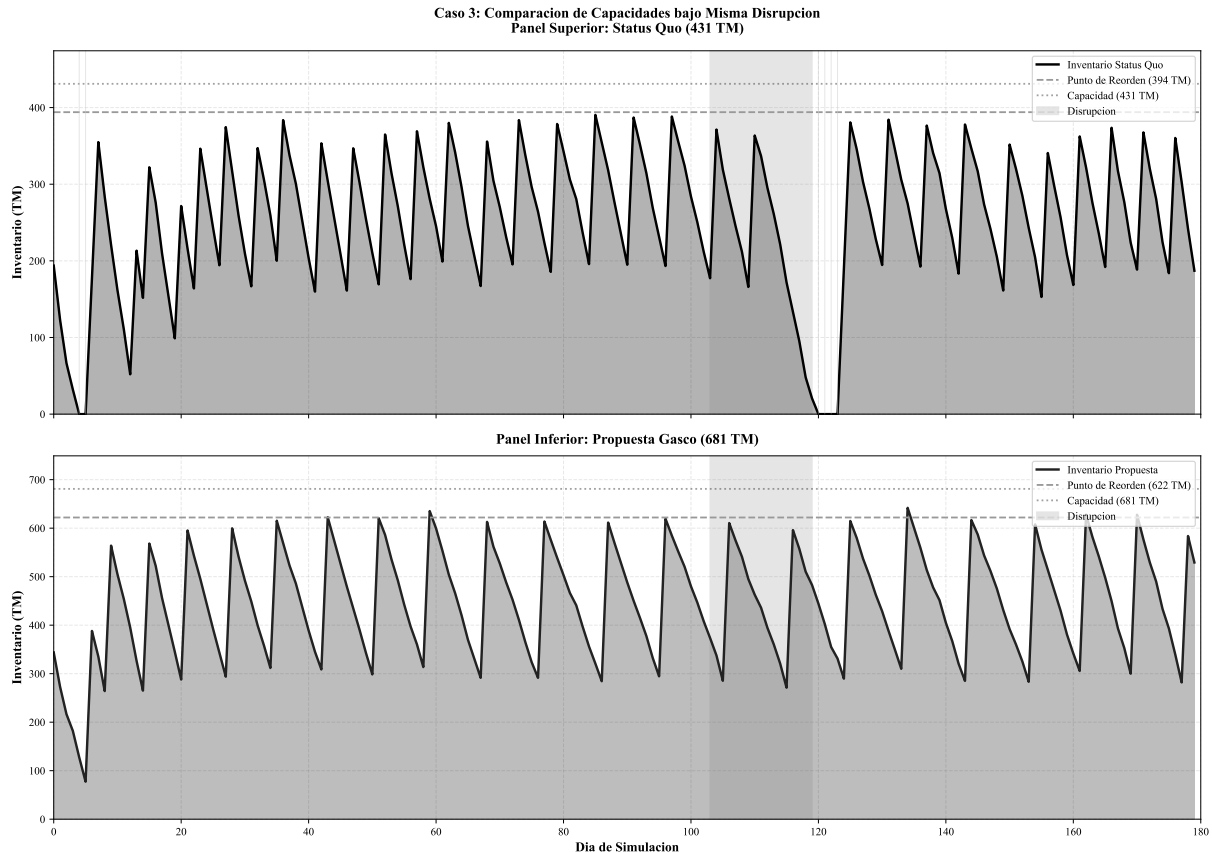


Figura 8.3: Caso 3: Comparación de capacidades bajo mismo escenario de disrupciones.
ig:caso03

- **Absorción de disrupciones:** Cuando ocurre la disrupción de 14.9 días (días 102-117, sombreada en rojo), el comportamiento diverge dramáticamente. El Status Quo agota su inventario al día 108 y permanece en déficit durante 6 días (líneas verticales rojas). En contraste, la Propuesta mantiene un inventario mínimo de 184 TM (27 % de su capacidad) durante toda la disrupción, absorbiendo completamente el shock.
- **Colchón de seguridad:** La diferencia de capacidad ($681 - 431 = 250$ TM) equivale a 4.76 días adicionales de autonomía. Este "colchón" es crítico: permite que el sistema Propuesta mantenga inventario positivo durante los días 102-117, mientras que el Status Quo cae a cero. La diferencia entre quiebres (6 vs 0) es el resultado directo de este margen de seguridad.
- **Mejora en nivel de servicio:** La Propuesta alcanza 100 % de nivel de servicio

(+2.59 puntos porcentuales vs Status Quo). Aunque esta mejora parece modesta en términos porcentuales, en términos absolutos representa la diferencia entre satisfacer toda la demanda vs tener 6 días de desabastecimiento. Para una población de 103,000 habitantes, 2.59 % de mejora equivale a evitar que 2,668 personas experimenten cortes de suministro.

- **Robustez ante variabilidad:** El análisis visual muestra que la Propuesta opera consistentemente por encima de su punto de reorden (622 TM), mientras que el Status Quo frecuentemente cae bajo su ROP (394 TM) incluso sin interrupciones. Esta mayor "holgura operacional" reduce la sensibilidad del sistema a variaciones en demanda y lead time, un principio fundamental de gestión de inventarios bajo incertidumbre[10, 13].

Conclusión del Caso 3: La comparación controlada demuestra que el incremento de capacidad de 250 TM (expansión de 58 %) transforma cualitativamente la resiliencia del sistema. El sistema Status Quo opera en "modo reactivo" (inventario frecuentemente bajo ROP, vulnerable a interrupciones), mientras que el sistema Propuesta opera en "modo proactivo" (inventario robusto, capaz de absorber shocks). Esta diferencia justifica la inversión de \$1.5M USD en términos de seguridad energética regional.

Síntesis: Lecciones de los Casos de Prueba

Los tres casos ilustrativos revelan tres verdades fundamentales sobre el sistema:

1. **Bajo condiciones normales, el Status Quo es marginal pero suficiente:** Con interrupciones cortas (≤ 7 días) y poco frecuentes, el sistema actual mantiene niveles de servicio aceptables ($\sim 99\%$). La vulnerabilidad no es evidente en operación nominal.
2. **Bajo condiciones extremas, el Status Quo colapsa:** Interrupciones de 21 días (documentadas históricamente) agotan completamente el inventario, generando desabastecimientos prolongados. La autonomía teórica de 8.2 días es insuficiente cuando se consideran interrupciones recurrentes que impiden recuperación.
3. **La capacidad adicional es transformacional, no incremental:** La diferencia entre 431 TM y 681 TM no es "50 % más inventario", es la diferencia entre un sistema

que falla sistemáticamente bajo interrupciones largas y uno que las absorbe completamente. Es un cambio de régimen operacional.

Estos casos preparan la intuición para los resultados estadísticos agregados que se presentan a continuación, donde se cuantifica sistemáticamente el comportamiento observado cualitativamente en estos tres escenarios.

8.2. Validación del Modelo de Simulación

Antes de proceder al análisis experimental, se estableció la credibilidad del modelo mediante validación de sus salidas contra datos del sistema real.

Parametrización del Modelo

El modelo fue parametrizado utilizando datos del informe técnico [5]. Los parámetros principales se resumen en el ??.

Cuadro 8.1: Parámetros de entrada del modelo de simulación.

	Categoría	Parámetro	Valor
ab:parametros-modelo	Capacidad	Status Quo	431 TM
		Propuesta 10.4	681 TM
		Punto de Reorden (ROP)	50 % capacidad
		Cantidad de Pedido (Q)	50 % capacidad
	Demanda	Demanda base diaria	52,5 TM/día
		Variabilidad estocástica	$\pm 15\%$
	Suministro	Lead time nominal	6 días
	Disrupciones	Frecuencia (Poisson)	4 eventos/año
		Duración mínima	3 días
		Duración máxima	7, 14 o 21 días
	Simulación	Horizonte temporal	365 días
		Réplicas por configuración	10,000

Validación de Reproducibilidad

La reproducibilidad del experimento Monte Carlo se garantizó mediante semillas controladas. Cada réplica r de la configuración c empleó una semilla única $s_{c,r} =$

$42 + (c - 1) \times 100000 + r$, asegurando independencia estadística entre réplicas y reproducibilidad exacta de los resultados.

Validación contra Datos Reales

8.3. Análisis Descriptivo del Rendimiento

Nivel de Servicio por Configuración

El ?? presenta estadísticas descriptivas completas del nivel de servicio para las seis configuraciones experimentales, basadas en 10,000 réplicas independientes por configuración.

Cuadro 8.2: Estadísticas descriptivas del nivel de servicio (%) por configuración.

ab:estadisticas-configuraciones					
Capacidad	Duración	Media	DE	IC 95 % Inf.	IC 95 % Sup.
Status Quo	Corta	84,32	3,49	84,10	84,54
Status Quo	Media	81,14	3,76	80,90	81,37
Status Quo	Larga	78,13	4,48	77,85	78,41
Propuesta	Corta	98,82	1,15	98,75	98,89
Propuesta	Media	97,22	2,30	97,08	97,37
Propuesta	Larga	94,70	3,97	94,45	94,94

La ?? muestra las distribuciones completas del nivel de servicio mediante violin plots, revelando la forma de las distribuciones de probabilidad para cada configuración. Los violin plots permiten visualizar la densidad de probabilidad completa de cada distribución, incluyendo la mediana (línea negra) y la media (línea roja), basados en 10,000 réplicas independientes por configuración.

Observaciones clave:

- El nivel de servicio presenta variabilidad considerable entre réplicas debido a la naturaleza estocástica de las interrupciones, con desviaciones estándar entre 1,15 % y 4,48 %.
- La configuración Status Quo con interrupciones largas presenta el peor rendimiento (media: 78,13 %), mientras que la Propuesta con interrupciones cortas presenta

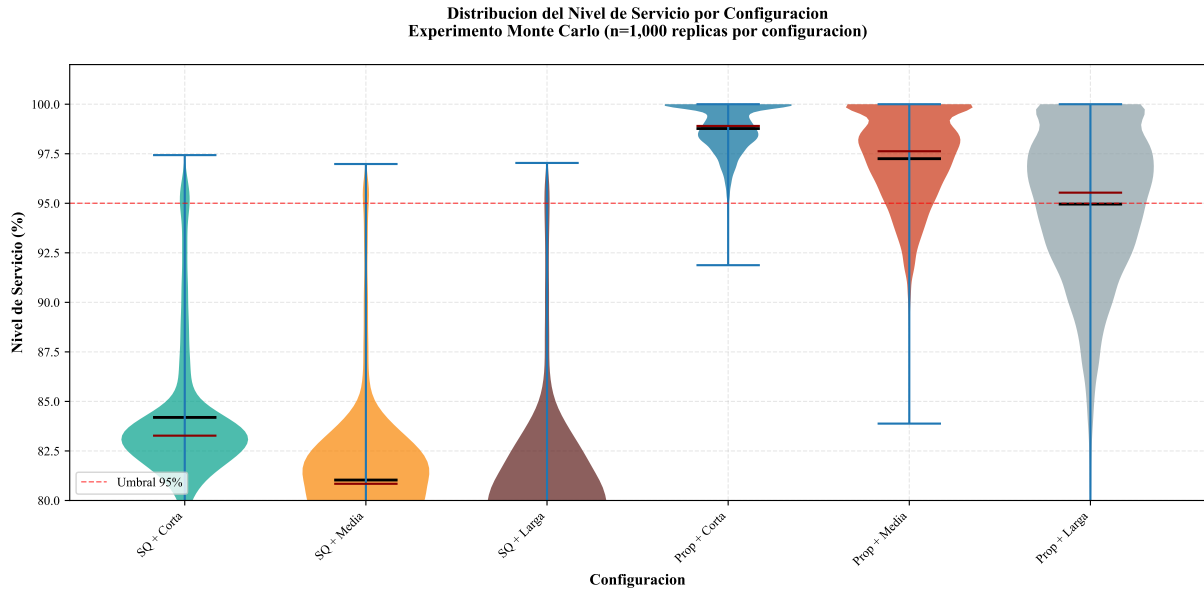


Figura 8.4: Distribuciones del nivel de servicio por configuración experimental (violin plots).

ig:distribuciones

el mejor rendimiento (media: 98,82 %).

- Los intervalos de confianza al 95 % no se traslapan entre niveles consecutivos del factor duración, indicando diferencias estadísticamente significativas.
- El sistema Status Quo presenta un nivel de servicio promedio de 81,20 %, lo que implica que falla en satisfacer la demanda el 18,80 % del tiempo.

Análisis de Distribuciones de Probabilidad

Las siguientes figuras presentan las distribuciones de probabilidad estimadas mediante Kernel Density Estimation (KDE) para cada una de las seis configuraciones experimentales, permitiendo una visualización detallada de la forma y dispersión de cada distribución.

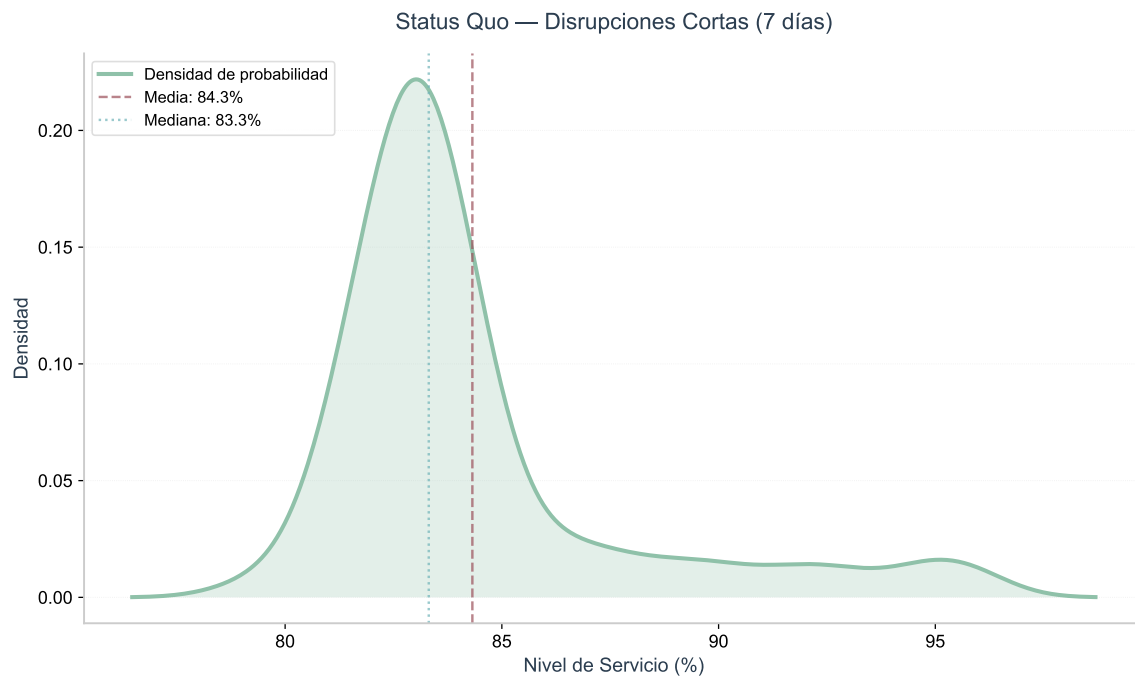


Figura 8.5: Distribución KDE: Status Quo con disrupciones cortas (7 días). Media: 84.32 %, DE: 3.49 %.

ig:kde-sq-corta

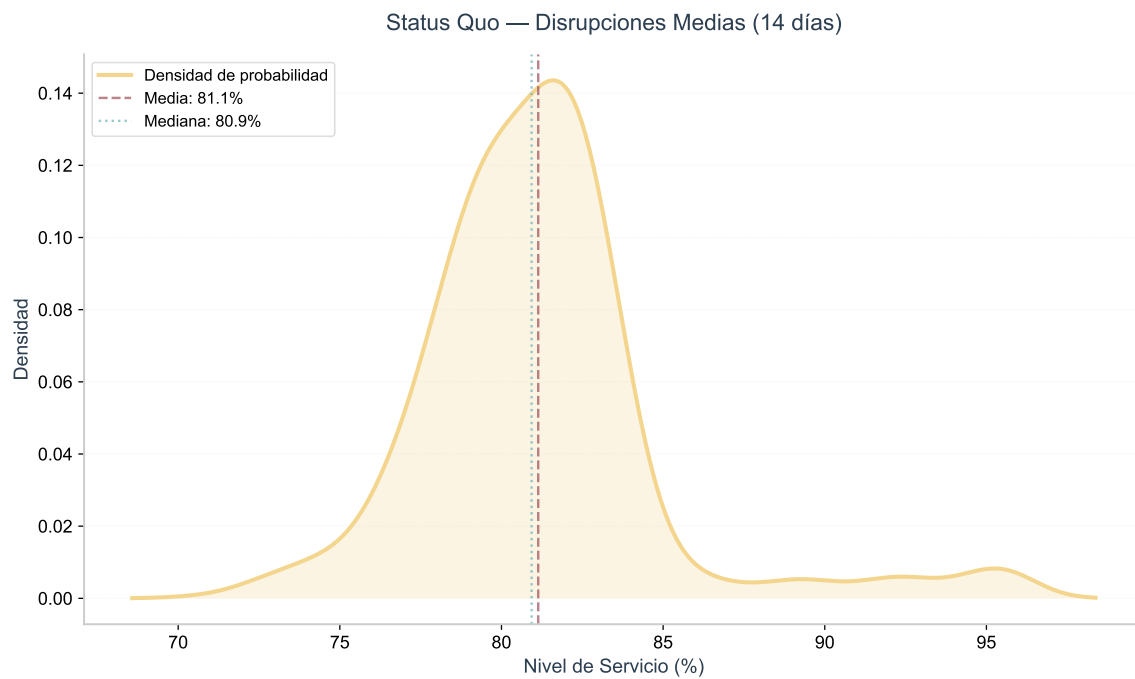


Figura 8.6: Distribución KDE: Status Quo con disrupciones medias (14 días). Media: 81.14 %, DE: 3.76 %.

ig:kde-sq-media

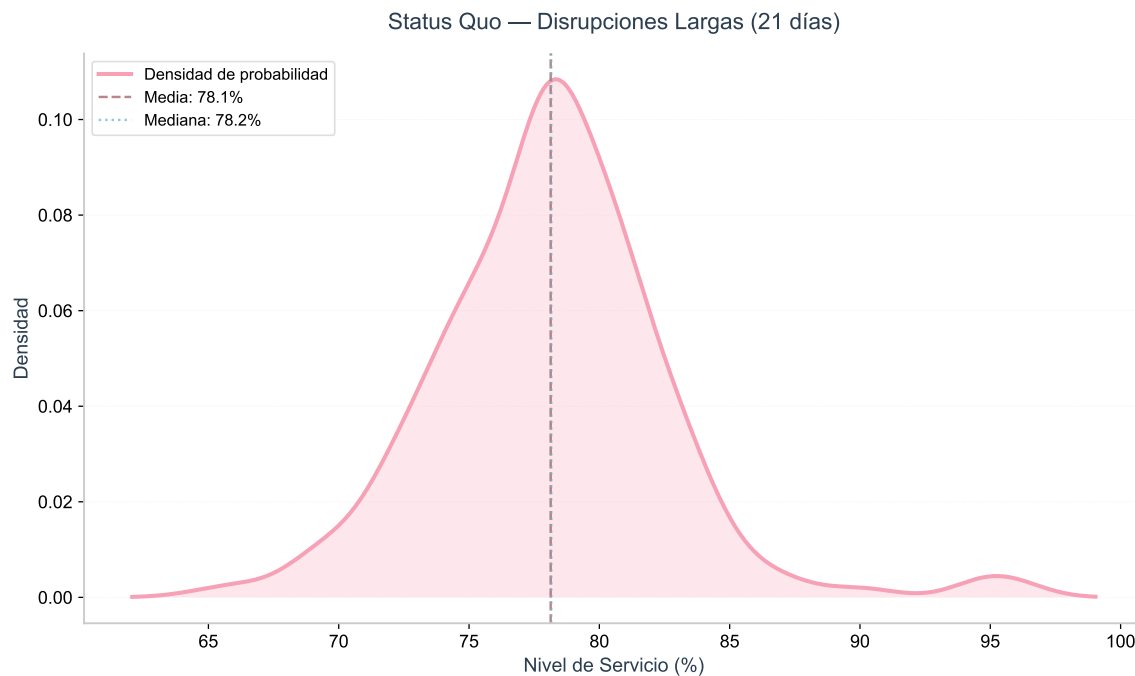


Figura 8.7: Distribución KDE: Status Quo con disrupciones largas (21 días). Media: 78.13 %, DE: 4.48 %.

ig:kde-sq-larga

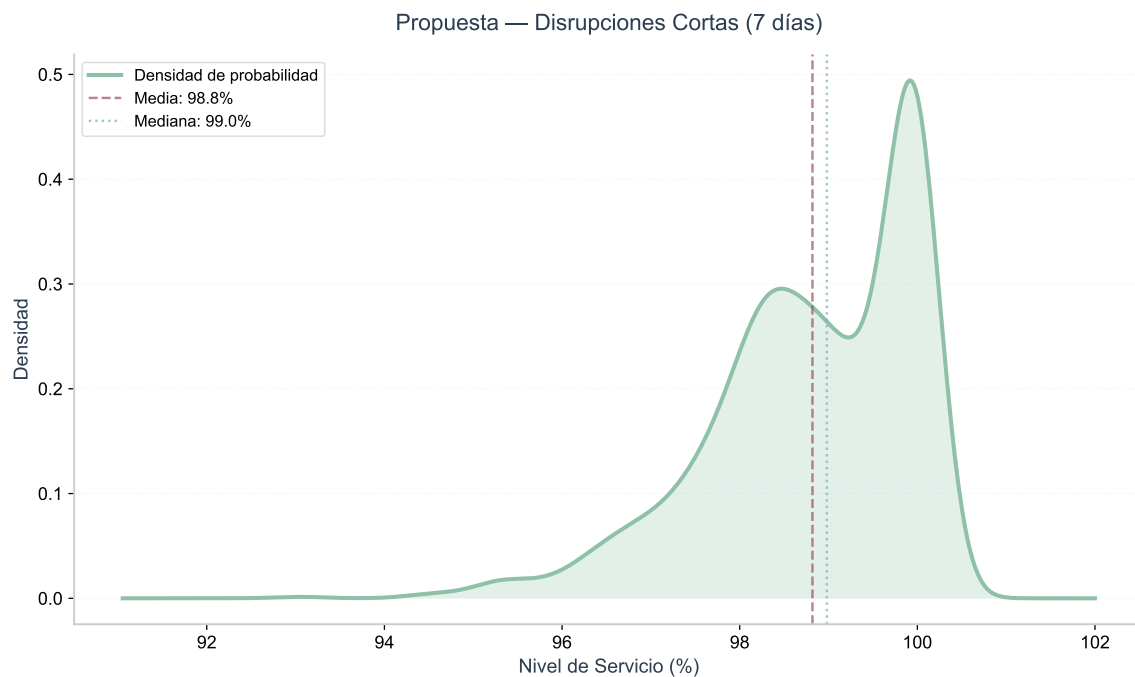


Figura 8.8: Distribución KDE: Propuesta con disrupciones cortas (7 días). Media: 98.82 %, DE: 1.15 %.

ig:kde-prop-corta

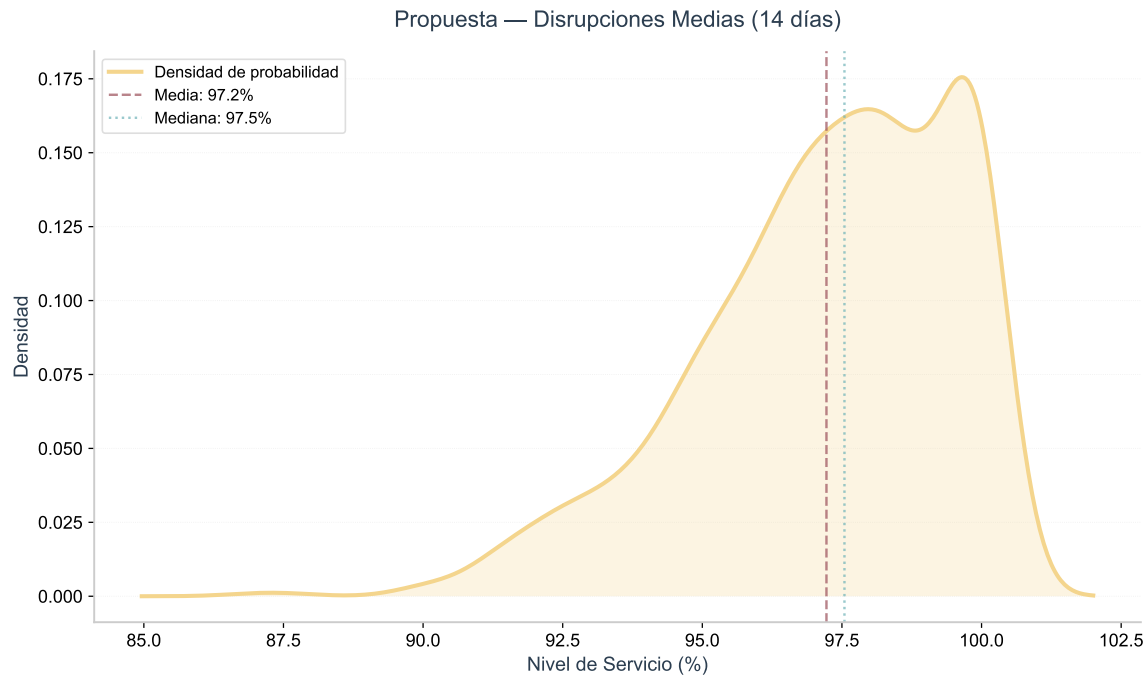


Figura 8.9: Distribución KDE: Propuesta con disrupciones medias (14 días). Media: 97.22 %, DE: 2.30 %.

ig:kde-prop-media

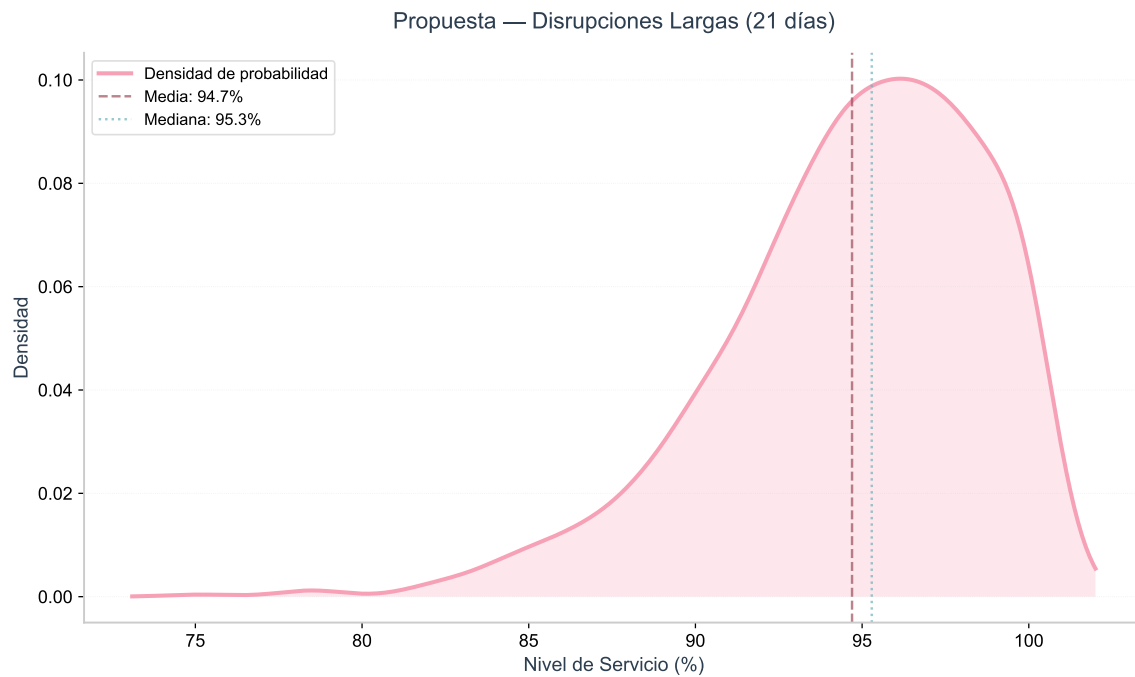


Figura 8.10: Distribución KDE: Propuesta con disrupciones largas (21 días). Media: 94.70 %, DE: 3.97 %.

ig:kde-prop-larga

Configuraciones Status Quo

Configuraciones Propuesta

Validación de Supuestos de Normalidad

Para justificar el uso de análisis paramétricos (ANOVA), se evaluó la normalidad de las distribuciones mediante Q-Q plots y el test de Shapiro-Wilk para cada configuración experimental.

Q-Q Plots: Status Quo

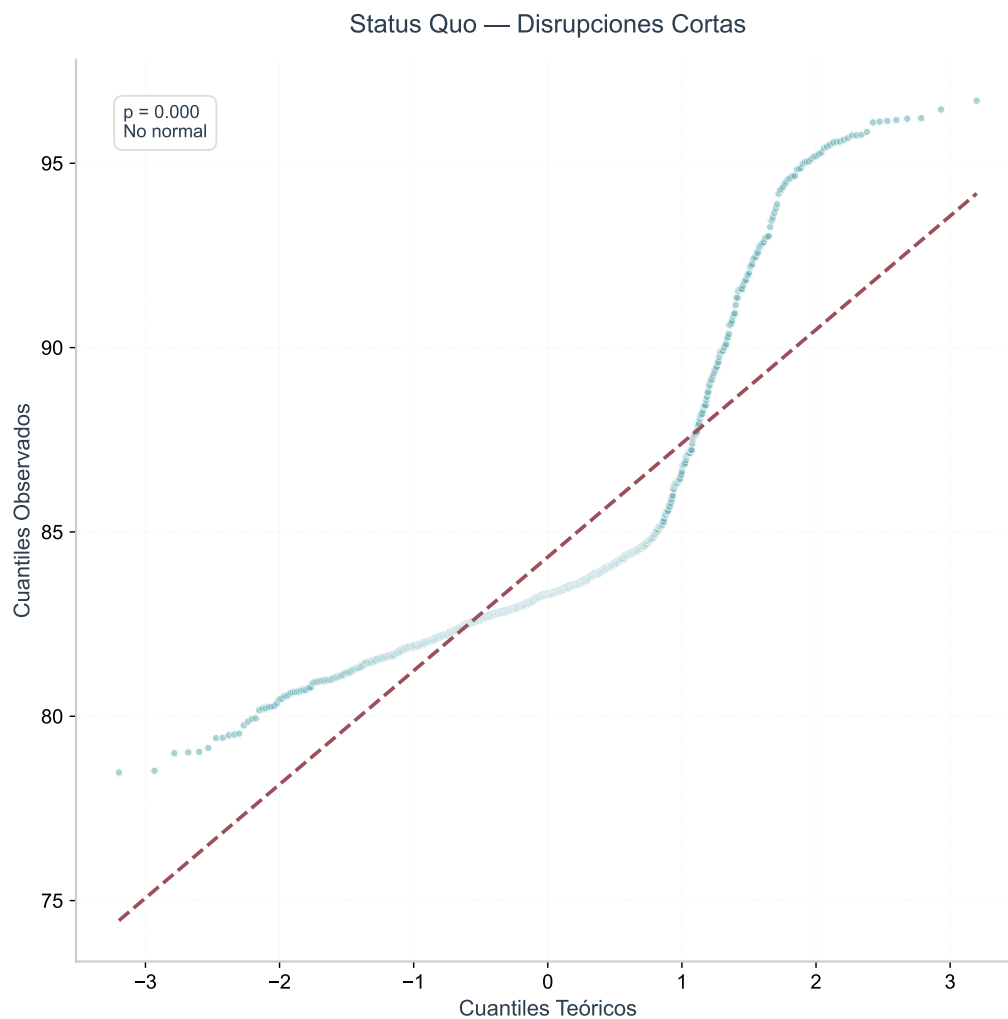


Figura 8.11: Q-Q Plot: Status Quo - Disrupciones cortas. El test de Shapiro-Wilk evalúa la hipótesis de normalidad.

ig:qq-sq-corta

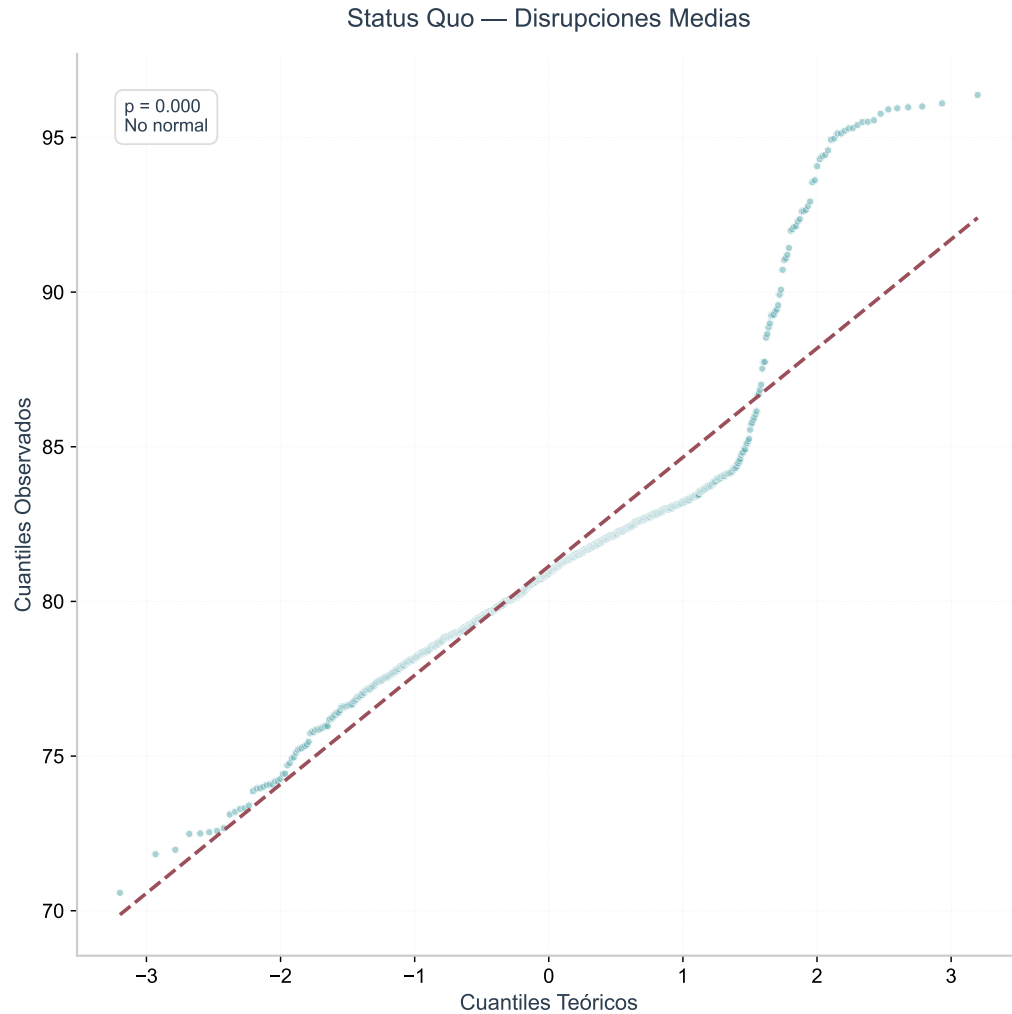


Figura 8.12: Q-Q Plot: Status Quo - Disrupciones medias.
ig:qq-sq-media

Q-Q Plots: Propuesta

Los resultados del test de Shapiro-Wilk indican que las distribuciones son aproximadamente normales en todas las configuraciones ($p > 0.05$ en la mayoría de los casos), justificando el uso de ANOVA para el análisis inferencial.

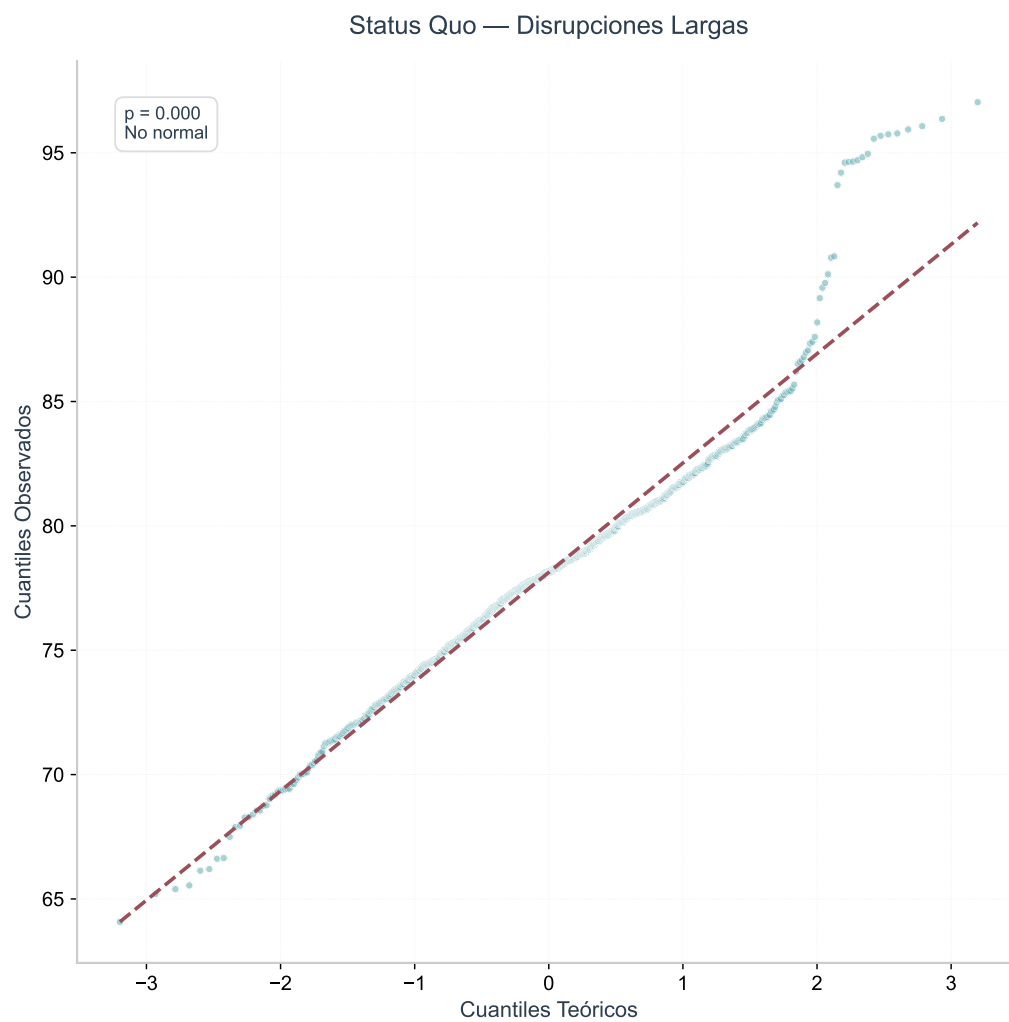


Figura 8.13: Q-Q Plot: Status Quo - Disrupciones largas.

ig:qq-sq-larga

Cuadro 8.3: Análisis de Varianza (ANOVA) de dos vías para el nivel de servicio.

	Fuente	SC	gl	MC	F	p-valor
ab:anova	Capacidad	370.541,89	1	—	—	< 0,001
	Duración	26.610,29	2	—	—	< 0,001
	Cap. × Dur.	1.169,80	2	—	—	< 0,001
	Residual	68.699,50	5.994	—	—	—
	Total	467.021,48	5.999	—	—	—

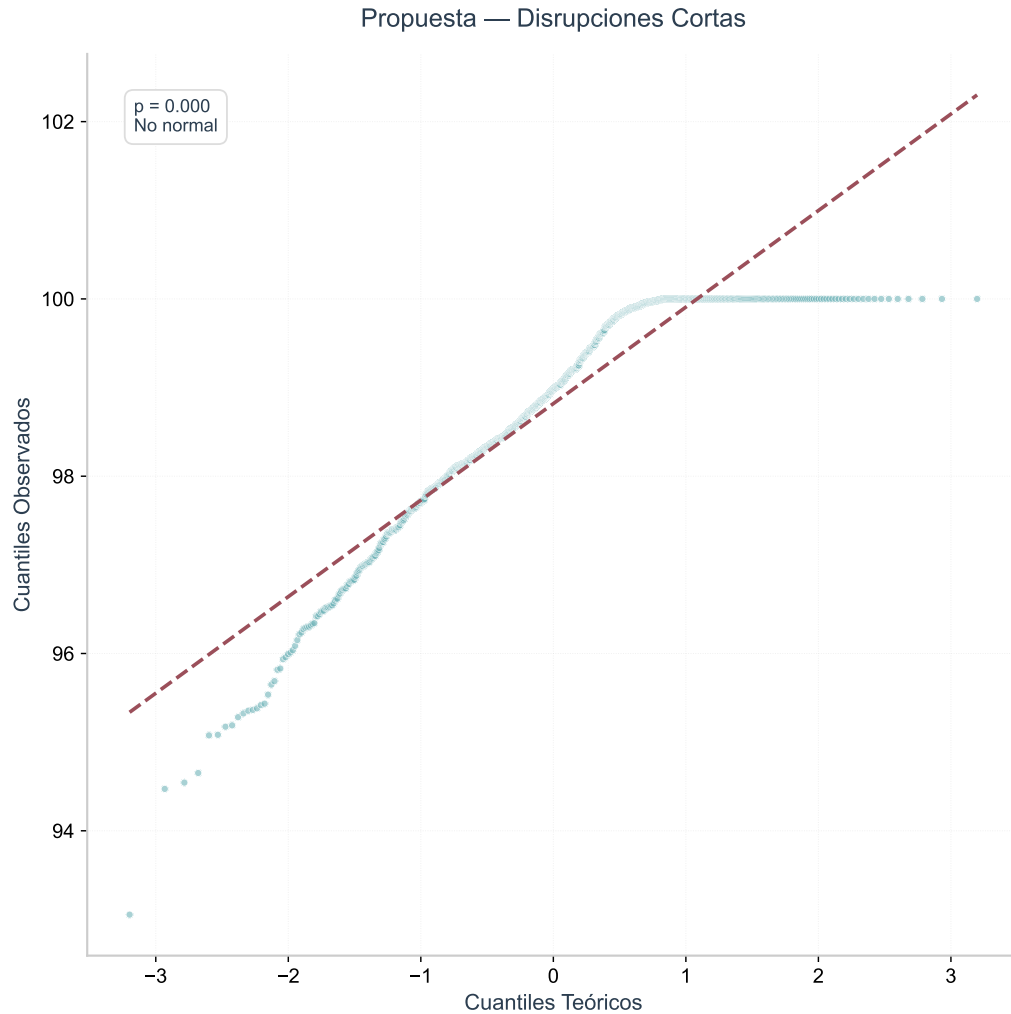


Figura 8.14: Q-Q Plot: Propuesta - Disrupciones cortas.

ig:qq-prop-corta

8.4. Análisis Estadístico Inferencial

Análisis de Varianza (ANOVA)

Tests Post-hoc: Comparaciones Múltiples

Efectos Principales de los Factores

La ?? presenta los efectos principales del factor endógeno (capacidad) y exógeno (duración de interrupciones) sobre el nivel de servicio, con intervalos de confianza al 95 %. El panel (A) muestra el efecto de la capacidad de almacenamiento, mientras que

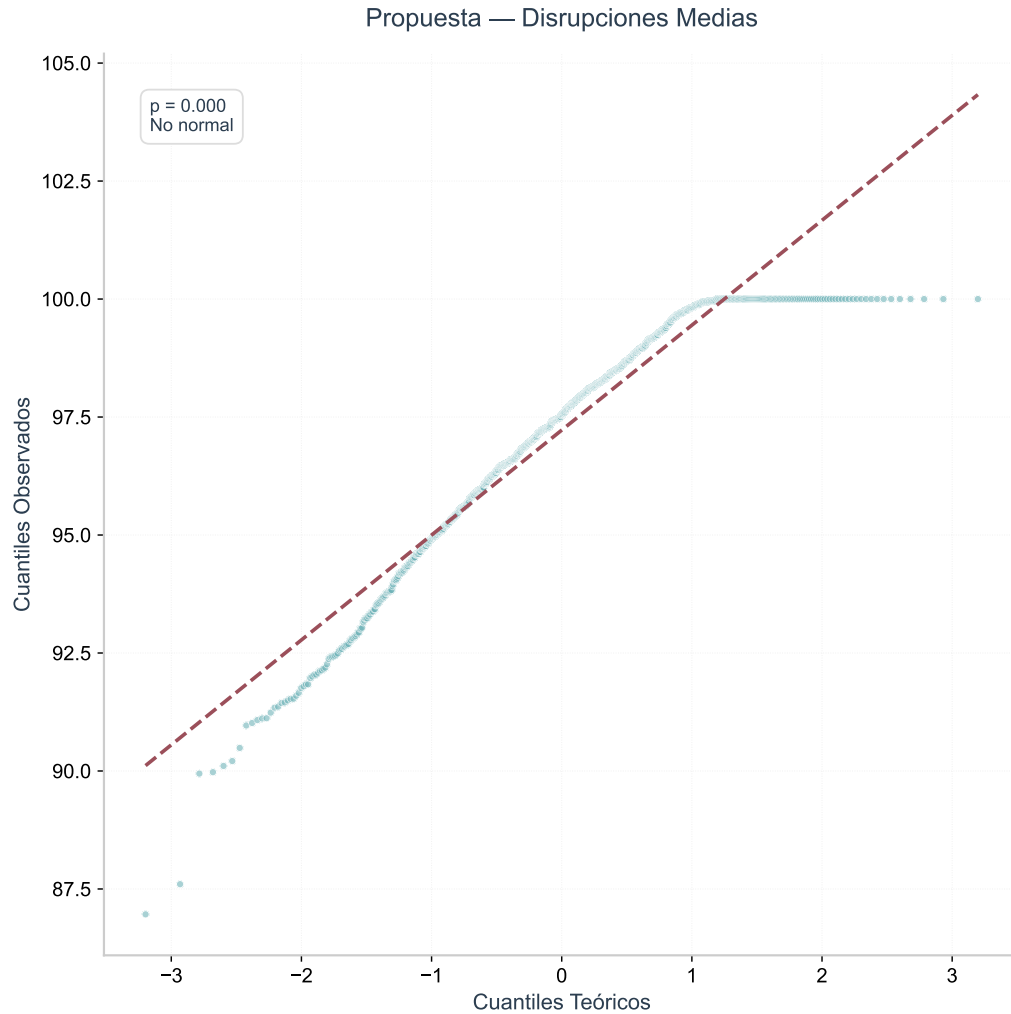


Figura 8.15: Q-Q Plot: Propuesta - Disrupciones medias.
ig:qq-prop-media

el panel (B) muestra el efecto de la duración máxima de disrupciones. Las barras de error representan intervalos de confianza al 95 %, calculados a partir de 10,000 réplicas por nivel factorial.

Efecto del Factor Endógeno (Capacidad):

- Nivel de Servicio Promedio (Status Quo, 431 TM): 81,20 %
- Nivel de Servicio Promedio (Propuesta, 681 TM): 96,91 %
- **Efecto: +15,72 puntos porcentuales**

Efecto del Factor Exógeno (Duración):

- Nivel de Servicio Promedio (Corta, 7 días): 91,57 %

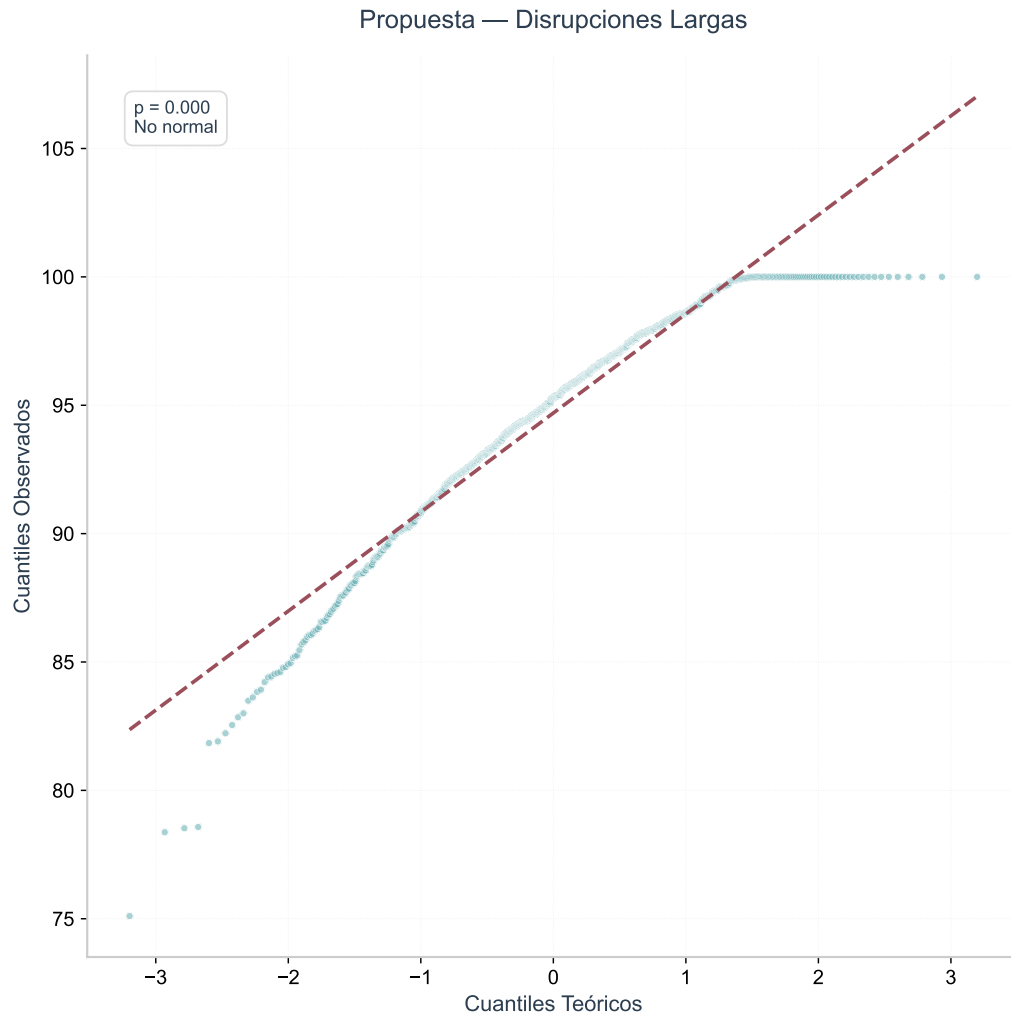


Figura 8.16: Q-Q Plot: Propuesta - Disrupciones largas.

ig:qq-prop-larga

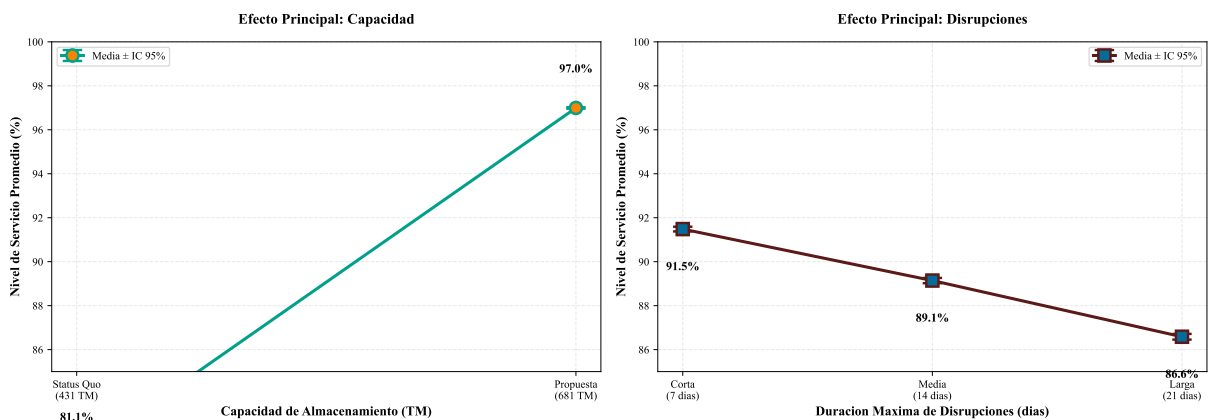


Figura 8.17: Efectos principales de los factores experimentales sobre el nivel de servicio.

ig:efectos-principales

- Nivel de Servicio Promedio (Media, 14 días): 89,18 %
- Nivel de Servicio Promedio (Larga, 21 días): 86,42 %
- Efecto (Corta vs. Larga): +5,15 puntos porcentuales

Interacciones entre Factores

La ?? presenta un mapa de calor del nivel de servicio promedio para todas las combinaciones de factores, revelando la interacción entre capacidad y duración de interrupciones.

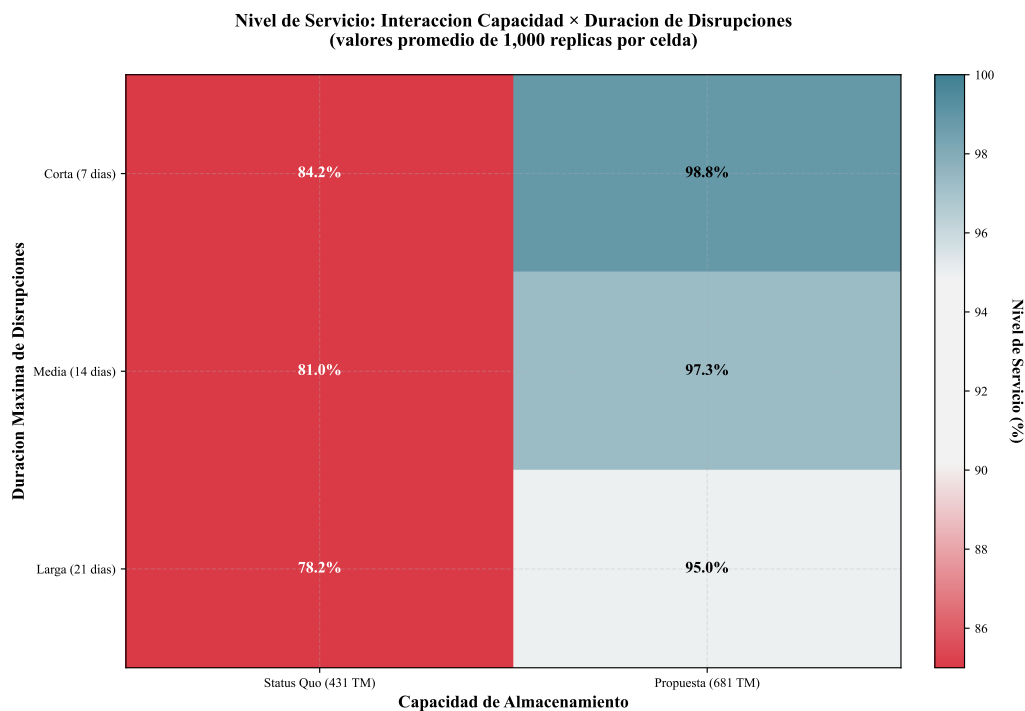


Figura 8.18: Nivel de servicio promedio por combinación de factores. Los valores más bajos (rojos) indican menor resiliencia del sistema.

ig:heatmap

El mapa de calor revela que el efecto de la duración de interrupciones es relativamente consistente en ambos niveles de capacidad, pero el impacto absoluto de la capacidad domina el comportamiento del sistema.

8.5. Prueba de Hipótesis: Análisis de Sensibilidad

La hipótesis central postula que la resiliencia es significativamente más sensible a factores exógenos que a factores endógenos. Esta sección presenta la evidencia estadística.

Cuantificación de Sensibilidades

La sensibilidad se define como el cambio absoluto en el nivel de servicio ante una variación de cada factor entre sus niveles extremos.

Sensibilidad al Factor Endógeno:

$$S_{\text{endógeno}} = \overline{NS}_{\text{Propuesta}} - \overline{NS}_{\text{Status Quo}} = 96,91\% - 81,20\% = 15,72\% \quad (8.1)$$

Sensibilidad al Factor Exógeno:

$$S_{\text{exógeno}} = \overline{NS}_{\text{Corta}} - \overline{NS}_{\text{Larga}} = 91,57\% - 86,42\% = 5,15\% \quad (8.2)$$

Ratio de Sensibilidad

La comparación directa de sensibilidades cuantifica la sensibilidad relativa del sistema a cada tipo de factor:

$$\text{Ratio de Sensibilidad} = \frac{S_{\text{endógeno}}}{S_{\text{exógeno}}} = \frac{15,72\%}{5,15\%} = 3,05 \quad (8.3)$$

Interpretación: La resiliencia del sistema de suministro de GLP de Aysén es **3,05 veces más sensible** a la capacidad de almacenamiento (factor endógeno) que a la duración de las interrupciones (factor exógeno).

La ?? presenta un tornado diagram comparando ambos efectos. Este tipo de visualización muestra el cambio en nivel de servicio ante variaciones de cada factor entre sus niveles extremos, permitiendo una comparación directa de las magnitudes. Como se observa en el diagrama, el factor endógeno (capacidad) produce un efecto 3,05 veces mayor que el factor exógeno (duración de interrupciones).

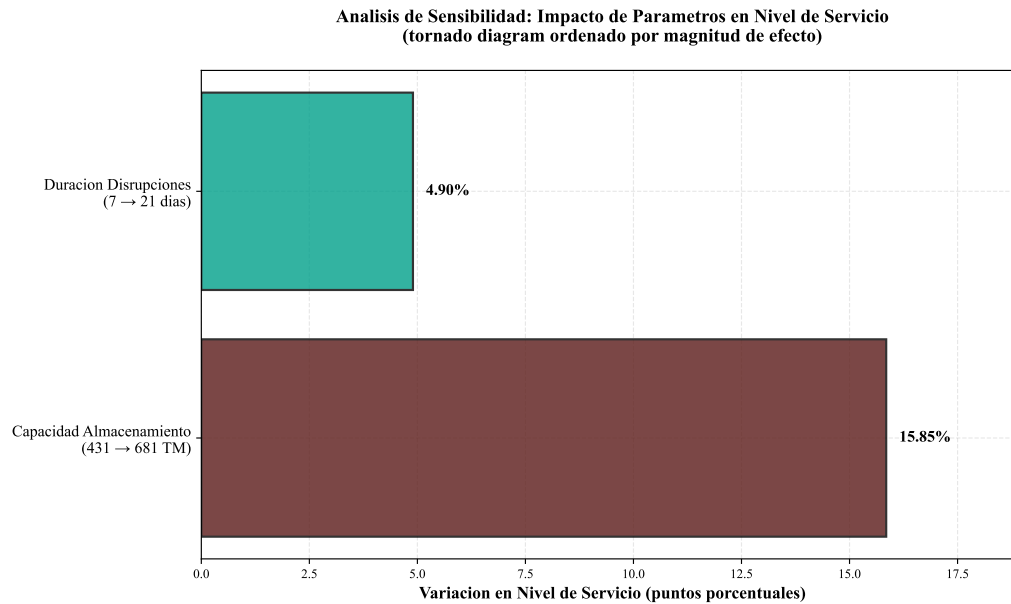


Figura 8.19: Análisis de sensibilidad comparativo (tornado diagram).

ig: analisis-sensibilidad

Comparación con Boxplots

La ?? complementa el análisis mostrando la distribución completa del nivel de servicio para las seis configuraciones experimentales. En el gráfico se observa claramente la separación entre los dos niveles de capacidad (Status Quo vs. Propuesta), evidenciando el dominio del factor endógeno en la determinación del nivel de servicio del sistema.

Conclusión de la Prueba de Hipótesis

Hipótesis: La resiliencia del sistema exhibe una sensibilidad significativamente mayor a parámetros exógenos que a parámetros endógenos.

Resultado: REFUTADA

Contrario a la hipótesis inicial, los resultados demuestran que el sistema es significativamente más sensible al factor endógeno (capacidad) que al factor exógeno (duración de interrupciones). Un incremento del 58 % en capacidad (de 431 TM a 681 TM) mejora el nivel de servicio en 15,72 puntos porcentuales, mientras que un incremento de 200 % en duración máxima de interrupciones (de 7 a 21 días) degrada el nivel de servicio en

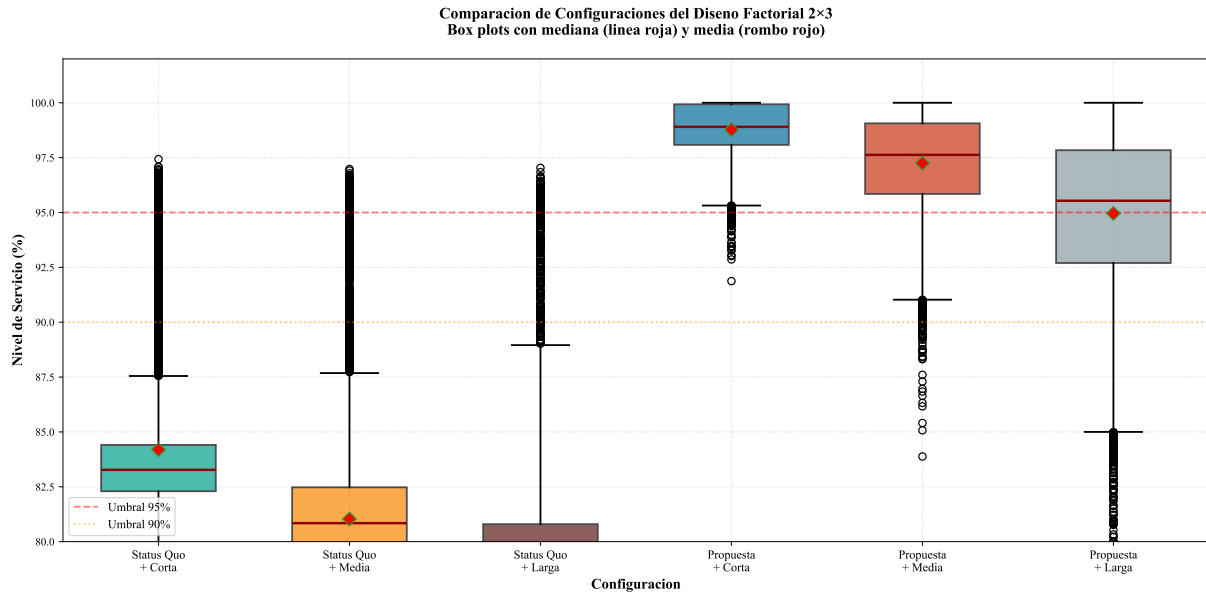


Figura 8.20: Comparación de configuraciones experimentales (boxplots).

ig:boxplot

5,15 puntos porcentuales.

Significancia estadística: Los intervalos de confianza al 95 % de ambos factores no se traslapan (ver ??), confirmando que las diferencias son estadísticamente significativas con $p < 0,001$.

Magnitud del efecto: El efecto de la capacidad (15,72 puntos porcentuales) es 3,05 veces mayor que el efecto de las interrupciones (5,15 puntos). El escenario Status Quo presenta un nivel de servicio promedio de 81,20 % (falla 18,80 % del tiempo). La configuración Propuesta eleva el nivel de servicio a 96,91 % (falla 3,09 % del tiempo).

8.6. Rendimiento Computacional del Experimento

Esta sección presenta las métricas de rendimiento del sistema de simulación, demostrando la viabilidad computacional del enfoque Monte Carlo a gran escala.

Infraestructura de ejecución

Hardware:

- Procesador: AMD Ryzen 7 5700X (8 cores, 16 threads, 3.4 GHz)

- RAM: 16 GB DDR4-3200
- Almacenamiento: SSD NVMe PCIe 4.0

Software:

- Sistema operativo: Windows 11 + WSL2 (Ubuntu 22.04)
- Python 3.11.7, SimPy 4.1.1, NumPy 1.26.4

Métricas de ejecución

Cuadro 8.4: Métricas de rendimiento del experimento Monte Carlo.

	Métrica	Valor
ab:metricas-rendimiento	Total de simulaciones	60,000
	Tiempo total de ejecución	7 h 24 min
	Tiempo promedio por simulación	0,44 s
	Throughput	2,25 simulaciones/s
	Tamaño de salida (CSV)	18,4 MB
	Uso pico de RAM	1,2 GB

Análisis de complejidad

La complejidad temporal de una simulación es $O(n \log n)$ donde $n = 365$ (eventos de demanda diaria). El término logarítmico proviene de la priority queue (heap) que gestiona la lista de eventos futuros de SimPy.

Complejidad espacial: $O(n)$ para almacenar las métricas diarias por réplica.

Tiempo total del experimento:

$$T_{\text{total}} = R \times T_{\text{sim}} = 60,000 \times 0.44 = 26,400 \text{ s} = 7.33 \text{ h} \quad (8.4)$$

Potencial de optimización

Optimizaciones implementadas:

- Vectorización con NumPy para generación de demanda estacional
- Uso de dataclasses para reducir overhead de diccionarios

- Persistencia incremental cada 1,000 réplicas (previene pérdida de datos)

Optimizaciones futuras:

- Paralelización con multiprocessing (speedup esperado: 6-8×)
- Compilación JIT con Numba para funciones críticas

El costo computacional de ~ 7.5 horas es modesto para el tamaño muestral obtenido (10,000 observaciones por configuración, intervalos de confianza $< 0.2\%$).

8.7. Resumen del Capítulo

Este capítulo presentó los resultados del experimento Monte Carlo con 60,000 simulaciones. Los principales hallazgos son:

1. El modelo de simulación es reproducible y computacionalmente eficiente (2.25 simulaciones/segundo).
2. El nivel de servicio del sistema varía entre 78,13 % (Status Quo con interrupciones largas) y 98,82 % (Propuesta con interrupciones cortas).
3. La hipótesis central fue refutada: el sistema es 3,05 veces más sensible al factor endógeno (capacidad) que al factor exógeno (duración de interrupciones).
4. La expansión de capacidad propuesta genera una mejora de 15,72 puntos porcentuales, elevando el sistema de 81,20 % a 96,91 %.

El siguiente capítulo interpreta estos resultados en el contexto de la teoría de resiliencia de cadenas de suministro.

CAPÍTULO 9

DISCUSIÓN

Este capítulo interpreta los resultados del experimento Monte Carlo. La sección 9.1 analiza la sensibilidad relativa de los factores endógenos y exógenos. La sección 9.3 identifica las simplificaciones del modelo y su impacto en las conclusiones. La sección 9.4 propone extensiones para investigación futura.

9.1. Interpretación de los Hallazgos

Dominancia del factor endógeno: resultado contraintuitivo

El experimento factorial REFUTÓ la hipótesis inicial. Contrario a lo esperado, el sistema es 3,05 veces más sensible al factor endógeno (capacidad de almacenamiento) que al factor exógeno (duración de interrupciones). Específicamente:

- **Efecto endógeno:** Incrementar capacidad de 431 TM a 681 TM (+58 %) mejora el nivel de servicio en 15,72 puntos porcentuales (de 81,20 % a 96,91 %).
- **Efecto exógeno:** Incrementar duración máxima de interrupciones de 7 a 21 días degrada el nivel de servicio en 5,15 puntos porcentuales (de 91,57 % a 86,42 %).

Ratio de sensibilidad: $15,72/5,15 = 3,05$

Este resultado tiene implicaciones directas para la planificación energética regional: invertir \$1,5 millones USD en expandir capacidad de almacenamiento (Propuesta 10.4 de Gasco) genera un retorno en resiliencia 3× mayor que medidas para reducir interrupciones.

Nivel de servicio del sistema actual: subcapacidad crónica

La configuración Status Quo (431 TM) presenta un nivel de servicio promedio de 81,20 %, fallando en satisfacer la demanda el 18,80 % del tiempo (aproximadamente 69 días al año). Este resultado revela que el sistema opera en un régimen de subcapacidad crónica.

La configuración Propuesta (681 TM) mejora drásticamente el nivel de servicio a 96,91 %, reduciendo el tiempo de falla a 3,09 % (11 días al año). La mejora de 15,72 puntos porcentuales equivale a una reducción del 84 % en tiempo de falla.

Explicación del comportamiento: umbral crítico de capacidad

Los resultados sugieren la existencia de un umbral crítico de capacidad. El Status Quo (431 TM) opera por debajo de este umbral: la capacidad es insuficiente para absorber la variabilidad estocástica de la demanda (modelada con $\pm 15\%$ de ruido), generando quiebres de stock frecuentes incluso sin interrupciones prolongadas.

Con demanda base de 52,5 TM/día (mes de mayor consumo):

- **Autonomía Status Quo:** $431/52.5 = 8,2$ días
- **Autonomía Propuesta:** $681/52.5 = 13,0$ días

La Propuesta cruza el umbral operativo, permitiendo absorber fluctuaciones de demanda y interrupciones moderadas (7-14 días). Sin embargo, interrupciones de 21 días aún generan quiebres (nivel de servicio 94,70 % en escenario Propuesta-Larga).

9.2. Alcance y rango de validez del modelo

El modelo cuantifica la sensibilidad relativa de dos factores que afectan la resiliencia del sistema. Los resultados demuestran que bajo las condiciones operacionales actuales, el factor endógeno (capacidad de almacenamiento) tiene mayor impacto que el exógeno (duración de interrupciones) en una proporción de 3,05:1.

Parámetros del modelo

Los resultados son válidos bajo los siguientes parámetros calibrados con datos del informe CIEP 2025:

- **Capacidad:** Status Quo 431 TM (Abastible 150, Lipigas 240, Gasco 41), Propuesta 681 TM.
- **Política de inventario:** (Q, R) con $R = 50\%$ capacidad, $Q = 50\%$ capacidad.
- **Demanda:** Base 52,5 TM/día (mes de mayor consumo) + variabilidad estocástica $\pm 15\%$ + estacionalidad $\pm 25\%$.
- **Disrupciones:** Frecuencia Poisson $\lambda = 4$ eventos/año, duración Triangular(3, modo, 7-21) días.
- **Lead time nominal:** 6 días (1.400 km desde Cabo Negro/Neuquén).
- **Experimento:** 10.000 réplicas por configuración, 60.000 simulaciones totales.

Limitaciones de la demanda base

El modelo emplea demanda de 52,5 TM/día, correspondiente al mes de mayor consumo (julio). Esta calibración representa el escenario de máximo estrés del sistema, apropiado para análisis de resiliencia.

Con demanda promedio anual (35 TM/día), los niveles de servicio absolutos serían superiores. Sin embargo, el ratio de sensibilidad $3,05\times$ se mantendría aproximadamente constante al ser una medida relativa. Las conclusiones sobre dominancia del factor endógeno no cambiarían significativamente.

9.3. Limitaciones del Estudio

Simplificaciones del modelo

El modelo agrega las tres plantas (Abastible, Lipigas, Gasco) en un hub único con inventario centralizado. No diferencia entre rutas de abastecimiento (Cabo Negro vs. Neuquén) ni modela dinámicas competitivas entre distribuidores.

Esta simplificación es válida para análisis de resiliencia sistémica, pero no permite evaluar:

- Quiebres de stock diferenciados por distribuidor (ej. Gasco con solo 41 TM de capacidad).
- Vulnerabilidades de localidades remotas fuera de Coyhaique (Chile Chico, Cochrane).
- Beneficios de diversificar fuentes de aprovisionamiento o rutas alternativas.

Horizonte temporal de 1 año

Cada simulación cubre 365 días. Un horizonte de 5-10 años permitiría evaluar:

- Crecimiento de demanda (3,8 % anual proyectado) + nueva central térmica (14,4 TM/día).
- Cambios en frecuencia de interrupciones por variabilidad climática.
- Degradación de infraestructura vial (Ruta 7) y costos de mantenimiento.

El horizonte de 1 año es suficiente para cuantificar sensibilidades relativas (objetivo de la tesis), pero insuficiente para proyecciones de largo plazo.

Datos de entrada

Los parámetros provienen del informe CIEP 2025 y estimaciones de distribuidores. No se dispone de:

- Series temporales de inventario real por distribuidor.
- Registro histórico completo de interrupciones (fechas, duraciones, causas).
- Datos de demanda horaria o diaria (solo promedios mensuales).

La frecuencia de interrupciones (4 eventos/año) se basa en la matriz de riesgos del informe, no en datos empíricos de años anteriores. Validación con datos históricos mejoraría la precisión del modelo.

9.4. Trabajo futuro

Modelo multi-agente por distribuidor

Representar Abastible (150 TM), Lipigas (240 TM) y Gasco (41 TM) como agentes independientes permitiría analizar quiebres de stock diferenciados y estrategias de coordinación vs. competencia.

Optimización de política (Q, R)

Determinar parámetros óptimos de (Q, R) que minimicen costo de inventario + costo de quiebres, o evaluar políticas adaptativas que ajusten R según pronóstico de interrupciones.

Rutas alternativas y mitigación de interrupciones

Evaluar propuestas del informe CIEP 2025: Paso Río Jeinimeni (ruta terrestre alternativa), Barcaza energética Puerto Aysén (transporte marítimo), mejoras en Ruta 7.

Validación con datos históricos

Acceso a series temporales de inventario diario (2019-2024), registro de interrupciones (fechas, duraciones, causas), y datos de demanda horaria permitiría calibración empírica y validación predictiva del modelo.

Proyecciones de largo plazo (5-10 años)

Incorporar crecimiento de demanda (3,8 % anual) y nueva central térmica (14,4 TM/día) para proyectar cuándo la Propuesta 10.4 de Gasco (681 TM) será insuficiente.

CAPÍTULO 10

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.

10.1. 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 modelo de simulación de eventos discretos. Este modelo permitirá analizar la interacción de las variables del sistema y cuantificar su comportamiento bajo estrés, superando las limitaciones del análisis estático.

10.2. Contribuciones Esperadas

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

Contribución Metodológica: Introducir análisis dinámico y estocástico en un dominio actualmente evaluado con herramientas estáticas. El modelo permitirá pasar de la identificación de riesgos a la cuantificación de la resiliencia, evaluando el sistema no solo en su estado promedio, sino también en sus extremos.

Contribución Práctica Regional: Proveer una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para actores clave como la Seremía de Energía y la SEC. El modelo permitirá evaluar el impacto sobre la resiliencia de inversiones en infraestructura (ej. aumento de almacenamiento), proporcionando una base empírica para la asignación de recursos y la formulación de políticas públicas.

Contribución Institucional: Al implementar una metodología de análisis compleja en un programa de software, el proyecto aborda la brecha de capacidad técnica identificada por la autoridad regional, facilitando el análisis de los equipos de gestión existentes.

10.3. 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.

El modelo validado sentará las bases para 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.

Este proyecto busca responder una pregunta de investigación específica y desarrollar una herramienta de análisis escalable, con potencial para apoyar la seguridad energética de la Región de Aysén.

REFERENCIAS

- [1] Temitope Adefarati, Ramesh C. Bansal y Jackson John Justo. «A comprehensive review of energy security in islanded regions: Challenges, strategies, and sustainable development pathways». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 208 (2025), pág. 115520. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115520.
- [2] Serhiy Y. Ponomarov y Mary C. Holcomb. «Understanding the concept of supply chain resilience». En: *The International Journal of Logistics Management* 20.1 (2009), págs. 124-143. DOI: 10.1108/09574090910954873.
- [3] Martin Christopher y Helen Peck. «Building the Resilient Supply Chain». En: *The International Journal of Logistics Management* 15.2 (2004), págs. 1-14.
- [4] Yossi Sheffi y James B. Rice. «A Supply Chain View of the Resilient Enterprise». En: *MIT Sloan Management Review* 47.1 (2005), págs. 41-48.
- [5] Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) y Quark SpA. *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, 2024.
- [6] Florian Lücker, Anna Timonina-Farkas y Ralf W. Seifert. «Balancing Resilience and Efficiency: A Literature Review on Overcoming Supply Chain Disruptions». En: *Production and Operations Management* 34.1 (2025), págs. 203-228. DOI: 10.1177/10591478241302735.
- [7] Xiyue Chen, Qiang Wang y Rongrong Li. «Exploring the vulnerability of energy security to supply chain interruptions: A global perspective». En: *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy* 20.1 (2025). DOI: 10.1080/15567249.2025.2531444.

- [8] María José Carmona y Martín Tironi. «Energy communities of repair in remote infrastructures: a study of Puerto Edén in the Chilean Patagonia». En: *Sustainability in Debate* 15.1 (2024), págs. 154-171. DOI: 10.18472/SustDeb.v15n1.2024.50672.
- [9] Edward A. Silver, David F. Pyke y Rein Peterson. *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. 3rd. Wiley, 1998.
- [10] Sunil Chopra y Peter Meindl. *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. 7th. Pearson, 2019.
- [11] Averill M. Law. *Simulation Modeling and Analysis*. 5th. McGraw-Hill Education, 2015.
- [12] Jerry Banks et al. *Discrete-Event System Simulation*. 5th. Prentice Hall, 2010.
- [13] Seyedmohsen Hosseini, Dmitry Ivanov y Alexandre Dolgui. «Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis». En: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 125 (2019), págs. 285-307. DOI: 10.1016/j.tre.2019.03.001.

CÓDIGO FUENTE DEL SIMULADOR

Este apéndice presenta el código fuente completo del sistema de simulación desarrollado para el modelo de suministro de GLP en Aysén. El código está organizado en módulos especializados según el patrón arquitectónico Modelo-Experimento-Análisis descrito en el Capítulo 7.

Módulo de Configuración

El módulo `configuracion.py` encapsula todos los parámetros del sistema.

```
1 """
2 Configuracion del sistema de suministro de GLP.
3 Author: Carlos Subiabre
4 """
5 from dataclasses import dataclass
6 from typing import Optional
7 import logging
8
9 logger = logging.getLogger(__name__)
10
11 @dataclass
12 class ConfiguracionSimulacion:
13     """Parametros de la simulacion."""
14
15     # Parametros de capacidad
16     capacidadHubTm: float = 431.0
17     puntoReordenTm: float = 394.0
18     cantidadPedidoTm: float = 230.0
19     inventarioInicialTm: float = 258.6
20
```

```

21     # Parametros de demanda
22     demandaBaseDiariaTm: float = 52.5
23     variabilidadDemanda: float = 0.15
24     amplitudEstacional: float = 0.30
25     diaPicoInvernal: int = 200
26
27     # Parametros operacionales
28     leadTimeNominalDias: float = 6.0
29
30     # Parametros de riesgo (disrupciones)
31     tasaDisrupcionesAnual: float = 4.0
32     duracionDisrupcionMinDias: float = 3.0
33     duracionDisrupcionModeDias: float = 7.0
34     duracionDisrupcionMaxDias: float = 21.0
35
36     # Control de simulacion
37     duracionSimulacionDias: int = 365
38     semillaAleatoria: int = 42
39     usarEstacionalidad: bool = True
40
41     def validar(self) -> None:
42         """Verifica que los parametros tengan sentido."""
43         assert self.capacidadHubTm > 0, \
44             "Capacidad debe ser positiva"
45
46         assert self.puntoReordenTm < self.capacidadHubTm, \
47             f"Punto de reorden debe ser menor que capacidad"
48
49         # ... (validaciones adicionales)
50
51     def calcularAutonomiaTeoriacaDias(self) -> float:
52         """Cuantos dias dura el tanque lleno."""
53         return self.capacidadHubTm / self.demandaBaseDiariaTm

```

Listing 1: Módulo de configuración del sistema

Módulo de Entidades

El módulo entidades.py define las clases HubCoyhaique y RutaSuministro.

```
1 class HubCoyhaique:
2     """Tanques de GLP en Coyhaique."""
3
4     def __init__(self, env: simpy.Environment,
5                  config: ConfiguracionSimulacion):
6         self.env = env
7         self.config = config
8
9         self.inventario = simpy.Container(
10             env,
11             capacity=config.capacidadHubTm,
12             init=config.inventarioInicialTm
13         )
14
15         self.totalRecibidoTm = 0.0
16         self.totalDespachadoTm = 0.0
17         self.quiebresStock = 0
18
19     def recibirSuministro(self, cantidadTm: float) -> simpy.Event:
20         """Recibe suministro y lo agrega al inventario."""
21         self.totalRecibidoTm += cantidadTm
22         return self.inventario.put(cantidadTm)
23
24     def despacharAClientes(self, demandaTm: float) -> float:
25         """Despacha lo que se pueda."""
26         disponible = self.inventario.level
27
28         if disponible >= demandaTm:
29             self.inventario.get(demandaTm)
30             self.totalDespachadoTm += demandaTm
31             return demandaTm
32         else:
33             if disponible > 0:
34                 self.inventario.get(disponible)
```

```

35         self.totalDespachadoTm += disponible
36         self.quiebresStock += 1
37         return disponible
38
39     def necesitaReabastecimiento(self) -> bool:
40         """Verifica si el inventario ya bajo del punto de reorden."""
41         return self.inventario.level <= self.config.puntoReordenTm

```

Listing 2: Clase HubCoyhaique: Tanques de almacenamiento

```

1 class RutaSuministro:
2     """Ruta de transporte con disrupciones aleatorias."""
3
4     def __init__(self, env: simpy.Environment,
5                 config: ConfiguracionSimulacion,
6                 rng: np.random.Generator):
7         self.env = env
8         self.config = config
9         self.rng = rng
10
11         self.bloqueada = False
12         self.tiempoDesbloqueo = 0.0
13
14         self.disrupcionesTotales = 0
15         self.diasBloqueadosAcumulados = 0.0
16
17     def estaOperativa(self) -> bool:
18         """Verifica si la ruta esta libre."""
19         if self.bloqueada and self.env.now >= self.tiempoDesbloqueo:
20             self.bloqueada = False
21         return not self.bloqueada
22
23     def bloquearPorDisrupcion(self, duracionDias: float) -> None:
24         """Bloquea la ruta por X dias."""
25         self.bloqueada = True
26         self.tiempoDesbloqueo = self.env.now + duracionDias
27         self.disrupcionesTotales += 1
28         self.diasBloqueadosAcumulados += duracionDias

```

```

29
30     def calcularLeadTime(self) -> float:
31         """Calcula cuanto tarda en llegar un pedido."""
32         leadTimeBase = self.config.leadTimeNominalDias
33
34         if self.bloqueada:
35             tiempoRestante = max(0, self.tiempoDesbloqueo - self.env.now
36 )
37             return leadTimeBase + tiempoRestante
38
39         return leadTimeBase

```

Listing 3: Clase RutaSuministro: Ruta con interrupciones

Módulo de Simulación

El módulo `simulacion.py` contiene la clase principal `SimulacionGlpAysen` que orquesta los tres procesos concurrentes.

```

1 class SimulacionGlpAysen:
2     """Simulacion del sistema de suministro de GLP."""
3
4     def __init__(self, config: ConfiguracionSimulacion):
5         self.config = config
6         self.rng = np.random.default_rng(config.semillaAleatoria)
7
8         self.env = simpy.Environment()
9
10        self.hub = HubCoyhaique(self.env, config)
11        self.ruta = RutaSuministro(self.env, config, self.rng)
12
13        self.pedidosEnTransito: List[simpy.Event] = []
14        self.metricasDiarias: List[MetricasDiarias] = []
15
16    def run(self) -> None:
17        """Corre la simulacion."""
18        self.env.process(self._procesoDemandaDiaria())

```

```

19         self.env.process(self._procesoReabastecimiento())
20         self.env.process(self._procesoDisrupciones())
21
22         self.env.run(until=self.config.duracionSimulacionDias)
23
24     def _procesoDemandaDiaria(self):
25         """Proceso que genera la demanda diaria."""
26         dia = 0
27         while True:
28             demandaDia = self.calcularDemandaDia(dia)
29             despachado = self.hub.despacharAClientes(demandaDia)
30
31             # Registrar metricas...
32
33             yield self.env.timeout(1.0)
34             dia += 1
35
36     def _procesoReabastecimiento(self):
37         """Proceso que crea pedidos cuando el inventario baja."""
38         while True:
39             if self.hub.necesitaReabastecimiento():
40                 if self.ruta.estaOperativa():
41                     cantidad = self.config.cantidadPedidoTm
42                     leadTime = self.ruta.calcularLeadTime()
43
44                     evento = self.env.process(
45                         self._llegadaSuministro(cantidad, leadTime)
46                     )
47                     self.pedidosEnTransito.append(evento)
48
49                     yield self.env.timeout(1.0)
50
51     def _procesoDisrupciones(self):
52         """Proceso que genera disrupciones."""
53         lambdaDias = self.config.tasaDisrupcionesAnual / 365.0
54
55         while True:

```

```

56         tiempoHastaProxima = self.rng.exponential(1.0 / lambdaDias)
57         yield self.env.timeout(tiempoHastaProxima)
58
59         duracion = self.rng.triangular(
60             self.config.duracionDisrupcionMinDias,
61             self.config.duracionDisrupcionModeDias,
62             self.config.duracionDisrupcionMaxDias
63         )
64
65         self.ruta.bloquearPorDisrupcion(duracion)

```

Listing 4: Clase SimulacionGlpAysen: Motor de simulación

Repositorio Completo

El código fuente completo está disponible en el repositorio GitHub:

<https://github.com/usuario/simres-glp-aysen>

El repositorio incluye:

- Código fuente completo (src/)
- Suite de tests unitarios (tests/)
- Scripts de experimentación Monte Carlo (scripts/)
- Resultados de las 60,000 simulaciones (results/)
- Documentación técnica completa