

TRABAJO DE GRADO

Análisis estocástico de escenarios operativos para una línea de producción de quesitos: una aproximación basada en Factory Physics, CVaR y dominancia estocástica

Corporación Universitaria Remington.

Facultad de Ingenierías

Ingeniería Industrial

Maria Camila Otalvaro Valencia

Tutor Juan David Ospina Correa

Proyecto de grado

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado a Dios, mi esposo y mi familia por ser el eje central y fundamental en cada etapa de mi vida. Gracias por siempre bríndame con su amor incondicional y por su apoyo constante, por creer en mí, por motivarme a dar siempre lo mejor y por acompañarme en este sueño que hoy se convierte en realidad. Este logro no es solo mío, sino también de cada uno de ustedes, quienes han sido parte fundamental de este camino y de la persona en la que me he convertido.

Agradecimientos

Este logro no habría sido posible sin la guía constante de Dios, por iluminar mi camino y por darme la fuerza para nunca rendirme. Agradezco mi esposo, mis padres, mi hermano y mis amigos por ser mi motor y mi inspiración, a los profesores por guiar mi aprendizaje y a cada persona que aportó un granito de arena en este camino. A la empresa Productos Lácteos Aura donde permitieron facilitar la información y los recursos necesarios para su ejecución y desarrollo del trabajo.

Tabla de Contenidos

Resumen	10
Palabras clave.....	11
Planteamiento del problema.....	12
Objetivos.....	16
Objetivo General	16
Objetivos específicos.....	16
Metodología	17
Caracterización del sistema productivo.....	18
Marco teórico-operacional: Factory Physics	19
Modelado estocástico de las variables del proceso	21
Distribución Gamma para tiempos de proceso	22
Distribución Bernoulli para eventos discretos	22
Distribución Uniforme para variables exógenas.....	23
Definición de los escenarios de análisis	23
Simulación Monte Carlo.....	25
Métricas de decisión y análisis comparativo	26
Esperanza y desviación estándar de η_{TH}	26
Probabilidad de cumplir el umbral operativo.....	27
Conditional Value-at-Risk (CVaR)	27
Score compuesto multicriterio	28
ROI estocástico	28

Dominancia estocástica de primer orden	29
Implementación computacional	29
Resultados y Discusión.....	31
Convergencia del estimador Monte Carlo	31
Distribución de las eficiencias η_{CT} y η_{WIP}	34
Identificación del cuello de botella	36
Relación entre WIP y eficiencia de throughput	37
Análisis de riesgo: CVaR y heatmap de percentiles	38
Frontera riesgo-rendimiento.....	40
Dominancia estocástica	42
Análisis económico: ROI y ranking compuesto	43
Discusión	45
La polivalente como cuello de botella estructural.....	45
La variabilidad como palanca dominante	46
Por qué las intervenciones de capital no rinden lo esperado	48
Garantía de leche 100 % retentada	48
Implementación de CONWIP	48
Ampliación del turno a doce horas.....	49
Implicaciones para la operación de la línea adquirida.....	49
Limitaciones del estudio	51
Conclusiones	52
Conclusiones sobre el desempeño esperado de la línea	52

Conclusiones sobre el cuello de botella.....	53
Conclusiones sobre las palancas de mejora	53
Conclusiones sobre el método empleado.....	54
Recomendaciones para trabajos futuros	54

Lista de tablas

Tabla 1 Configuración paramétrica de los seis escenarios simulados.....	23
Tabla 2 Costos de implementación de las intervenciones evaluadas.	25

Lista de figuras

Ilustración 1 Convergencia de la media acumulada de η_{TH} a lo largo de las 5000 iteraciones por escenario.....	32
Ilustración 2 Histogramas de η_{TH} por escenario, con marca de mediana y línea de referencia del umbral del 85 %.....	33
Ilustración 3 Boxplot comparativo de η_{TH} para los seis escenarios; línea roja punteada en el objetivo del 85 %.....	34
Ilustración 4 Boxplot comparativo de η_{CT}	35
Ilustración 5 . Boxplot de η_{WIP} — la línea opera ya en el WIP crítico en todos los escenarios.....	36
Ilustración 6 Probabilidad empírica del cuello de botella por escenario (apilada: polivalente vs. empaque).....	37
Ilustración 7 Dispersiones WIP real vs. η_{TH} para los seis escenarios; línea de referencia en el 85 %.....	38
Ilustración 8 CVaR_95 % de η_{TH} por escenario; valores altos indican menor riesgo de cola adversa.....	39
Ilustración 9 Heatmap de percentiles de η_{TH} (P5 a P95) por escenario.....	40
Ilustración 10 Frontera riesgo-rendimiento — CVaR_95 % vs. $E[\eta_{TH}]$ por escenario; tamaño del punto proporcional a σ	41
Ilustración 11 CDFs de η_{TH} por escenario y matriz de dominancia pareada $P(\eta_{fila} > \eta_{columna})$	42

Ilustración 12 Ganancia anual esperada vs. costo de implementación, y ROI estocástico, por escenario con inversión.....	43
Ilustración 13 Ranking de escenarios por score compuesto y perfil radar multidimensional del top 3.....	44

Resumen

El presente trabajo evaluó el desempeño de una nueva línea de producción de quesitos en una planta del sector lácteo colombiano mediante un modelo de simulación estocástica fundamentado en el marco teórico de Factory Physics (Hopp & Spearman, 2008). El sistema comprende dos etapas críticas en serie: una etapa de evacuación en cuatro tinas polivalentes y una etapa de empaque manual, operando en turnos de ocho horas con entre trece y dieciocho operarios. La capacidad nominal asciende a aproximadamente 4.600 unidades por turno, frente a un rendimiento real cercano a 2.800 unidades, lo que evidencia una utilización del 60 % y motiva la pregunta central: ¿qué configuración operativa maximiza la eficiencia sin comprometer la estabilidad frente al riesgo?

Para responder esta pregunta se construyeron seis escenarios operativos base actual, optimista, pesimista, 100 % de leche retentada, CONWIP activo y turno ampliado a doce horas simulados mediante Monte Carlo con 5.000 réplicas independientes. Cada réplica calculó las tres eficiencias adimensionales de Factory Physics: eficiencia de throughput (η_{TH}), eficiencia de tiempo de ciclo (η_{CT}) y eficiencia de inventario en proceso (η_{WIP}). El análisis comparativo empleó cinco métricas: esperanza, probabilidad de superar el umbral del 85 %, Conditional Value-at-Risk al 95 % (CVaR), un score compuesto multicriterio inspirado en Markowitz (1952) y verificación de dominancia estocástica de primer orden.

Los resultados arrojaron tres hallazgos principales. Primero, en cinco de los seis escenarios la etapa de evacuación actúa como cuello de botella en prácticamente el 100 % de las réplicas, constituyendo una restricción estructural del sistema. Segundo, las tres intervenciones de capital evaluadas garantía de leche retentada, CONWIP y turno extendido generaron retornos negativos de $-6,86x$, $-3,26x$ y $-1,91x$ respectivamente, todos por debajo del umbral mínimo aceptable. Tercero, el escenario optimista, basado en reducir la variabilidad de los tiempos de proceso sin inversión adicional, alcanzó un CVaR del 46,2 % frente al 7,6 % del escenario base, posicionándose en la frontera eficiente riesgo-rendimiento.

Se concluye que, dado que la inversión en la línea representa un costo hundido, la palanca de mejora prioritaria consiste en programas de estandarización del trabajo y reducción de tiempos de cambio mediante SMED (Shingo, 1985), antes que en intervenciones de capacidad o política de inventario. El estudio aporta un diagnóstico cuantitativo directamente aplicable a la operación y una metodología replicable que integra Factory Physics, simulación de Monte Carlo y métricas de riesgo coherentes para la toma de decisiones bajo incertidumbre.

Palabras clave

Factory Physics, simulación de Monte Carlo, eficiencia operativa, Conditional Value-at-Risk, cuello de botella, industria láctea.

Planteamiento del problema

La industria láctea en colombiana enfrenta importantes desafíos relacionados con la eficiencia operativa, la estabilidad de los procesos productivos y la capacidad de respuesta frente a entornos de alta variabilidad. En este contexto, las empresas dedicadas a la transformación de productos derivados de la leche deben optimizar continuamente sus líneas de producción para mantener niveles competitivos de productividad, calidad y rentabilidad, especialmente en operaciones donde predominan procesos manuales y variabilidad asociada a materias primas, tiempos de procesamiento y disponibilidad de recursos humanos.

La planta objeto de estudio cuenta con una línea de producción de quesitos cuya capacidad teórica nominal alcanza aproximadamente 4.600 unidades por turno; sin embargo, el rendimiento operativo real observado es cercano a 2.800 unidades por jornada, equivalente a una utilización aproximada del 60 % de la capacidad instalada. En esta diferencia evidencia la existencia de restricciones operativas, pérdidas de eficiencia y fenómenos de variabilidad que afectan directamente el desempeño global del sistema productivo.

Aunque Productos Lácteos Aura ha considerado distintas alternativas de mejora, como ampliación de turnos, implementación de políticas CONWIP y garantía de leche retentada, no existe evidencia cuantitativa suficiente que permita determinar cuál de estas estrategias realmente mejora el desempeño del sistema sin incrementar el riesgo

operativo o generar inversiones poco rentables. En consecuencia, las decisiones operacionales podrían tomarse de manera intuitiva o basadas únicamente en indicadores promedio, ignorando el efecto de la variabilidad y de los eventos extremos sobre la estabilidad de la producción.

Adicionalmente, en muchas organizaciones manufactureras las decisiones de mejora continúan fundamentada en el análisis determinantes tradicionales, los cuales no representan adecuadamente la naturaleza aleatoria de los sistemas productivos reales. Esto limita la capacidad de anticipar comportamientos críticos, identificar riesgos de cola y comprender el impacto de la incertidumbre sobre variables como el throughput, el tiempo de ciclo y el inventario en proceso.

Frente a esta problemática surge la necesidad de desarrollar un modelo analítico que permita evaluar diferentes configuraciones operativas bajo condiciones de incertidumbre, integrando herramientas de Factory Physics, simulación Monte Carlo y métricas avanzadas de riesgo operacional como el Conditional Value-at-Risk (CVaR), con el fin de identificar cuáles estrategias generan el mejor equilibrio entre eficiencia, estabilidad y rentabilidad.

Justificación

La presente investigación se justifica desde los ámbitos operativo, económico, académico y metodológico, la necesidad de mejorar el desempeño del sistema productivo sometido a altos niveles de variabilidad e incertidumbre, particularmente en la industria láctea colombiana.

Mediante el uso de la simulación de Monte Carlo (5.000 réplicas por escenario), esta investigación rompe con el paradigma y permite identificar con precisión el cuello de botella estructural dentro del sistema. Los resultados demuestran que la etapa de evacuación actúa como la restricción del sistema; al evidenciar que la etapa de empaque cuenta con capacidad sobrante, el proyecto evita que la empresa realice inversiones inútiles en la zona de empaque, focalizando los esfuerzos de ingeniería donde realmente se genera valor; adicional se mitiga de forma directa el riesgo de destrucción de capital, la gerencia de operaciones tiende a solucionar problemas de capacidad recurriendo a inversiones de capital (CapEx) o incrementos de costos operativos (OpEx).

El estudio evaluó tres intervenciones de este tipo: la garantía logística de leche 100% retentada, la activación de un sistema CONWIP y la ampliación del turno a 12 horas (con costos anualizados de 5, 8 y 30 millones de COP respectivamente). La simulación demostró de forma contundente que estas tres opciones generan retornos sobre la inversión (ROI) negativos (-6.86x, -3.26x y -1.91x respectivamente). Por ende, el verdadero impacto económico del proyecto consiste en demostrar que la rentabilidad de

la línea se maximiza mediante una estrategia de costo cero centrada en el "Escenario Optimista": la reducción de la variabilidad interna mediante estandarización del trabajo y técnicas SMED.

El proyecto se justifica en el desarrollo de la toma de decisiones bajo incertidumbre que une tres pilares de ingeniería moderna:

- Física de plantas (Factory Physics)
- Simulación computacional estocástica
- Gestión del riesgo financiero aplicado a operaciones mediante el Conditional Value-at-Risk (CVaR).

Este enfoque permite entrega una metodología replicable para evaluar la resiliencia operativa en escenarios críticos donde se concentran las pérdidas por fallas de calidad o retrasos.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el desempeño esperado y el riesgo operativo de la nueva línea de producción de quesitos bajo seis configuraciones operativas alternativas, e identificar la combinación de alternativas de mejora que maximiza la eficiencia operativa sin comprometer la estabilidad frente al riesgo.

Objetivos específicos

- Caracterizar el sistema productivo en términos de parámetros como: tasa del cuello de botella, tiempo de proceso bruto (T0) y WIP crítico (W0).
- Construir y parametrizar un modelo estocástico que represente la variabilidad de tiempos de proceso, disponibilidad de operarios y rechazos de calidad mediante distribuciones paramétricas apropiadas (Gamma, Bernoulli, Uniforme).
- Simular escenarios operativos alternativos (base, optimista, pesimista, 100% retentada, CONWIP activo, turno ampliado) mediante aproximación Monte Carlo para estimar las distribuciones de eficiencia η_{TH} , η_{CT} y η_{WIP} .
- Comparar los escenarios mediante métricas de expectativa y riesgo (esperanza, $P(\eta_{TH} \geq 0,85)$, CVaR95%, score multicriterio y dominancia estocástica de primer orden) e identificar las intervenciones operativas con mejor trade-off rendimiento-riesgo.

Metodologia

El presente capítulo describe el procedimiento metodológico empleado para evaluar el desempeño esperado de la nueva línea de producción de quesitos a partir de un modelo de simulación estocástica que incorporara la aleatoriedad (incertidumbre) para aproximar las probabilidades y algunos valores esperados anclado en los principios de Factory Physics (Hopp & Spearman, 2008). El estudio adopta un enfoque cuantitativo basado en datos y cálculos de análisis, descriptivo-explicativo y prospectivo, cuyo propósito no es predecir un valor puntual de producción y las posibles tendencias, sino caracterizar la distribución de la probabilidad de los indicadores de eficiencia bajo diferentes configuraciones operativas y con base en ella, identificar las palancas de mejora con mayor poder explicativo sobre la variabilidad observada. La estrategia metodológica se estructura en seis fases consecutivas:

- i. Formalización del sistema productivo en términos de Factory Physics; bajo un sistema matemático en que se contemplan maquinas, tiempos y procesos
- ii. Modelado estocástico de las variables de proceso mediante distribuciones paramétricas adecuadas a la naturaleza física de cada fenómeno; bajo tiempos de producción (Distribución Normal) y posibles fallas (Distribución exponencial).
- iii. Definición de un conjunto de escenarios que representan políticas operativas alternativas bajo las formas de opera por el personal, las máquinas y cambios en los turnos de trabajo.

- iv. Ejecución de una simulación Monte Carlo con cinco mil réplicas independientes por escenario, en las que se podrá observar el comportamiento promedio y algunos posibles riesgos.
- v. Cálculo de métricas estadísticas y financieras de decisión, incluyendo el Conditional Value-at-Risk (CVaR), un score compuesto multicriterio y un análisis de retorno sobre la inversión.
- vi. Verificación de la dominancia estocástica entre escenarios.

Para todos los escenarios, el procesamiento numérico se realizó en el software MATLAB R2025b.

Caracterización del sistema productivo

El sistema bajo estudio corresponde a una línea de producción de empaque de quesitos de forma manual y posterior ubicados en canasta. El proceso se compone de dos etapas críticas en serie:

- a. Una etapa de evacuación realizada en tinas polivalentes de diferentes tamaños, tres polivalentes de 6000 Lts y una polivalente de 11000 Lts, en las que se realiza el cuajado, corte, desuerado, molido, integración con la sal y moldeo.

- b. Una etapa de empaque manual, donde un grupo de operarios empacan el quesito en laminas plásticas que posterior son ubicados encanasta a una tasa promedio de setenta y cinco canastas por operario por turno. La etapa de evacuación está sujeta a variabilidad inducida por el tipo de leche procesada, distinguiéndose entre leche cruda

fresca y leche retentada (con mayor concentración de proteína luego de haber pasado por equipo de ultrafiltración), esta última con un tiempo de procesamiento aproximadamente sesenta por ciento mayor. La planta opera turnos productivos de ocho horas con una distribución de operarios variable entre trece y dieciocho personas por turno, y aplica pausas reglamentarias de lavado de manos cada treinta minutos con duración entre treinta y sesenta segundos más una pausa de alimentación de treinta minutos. La capacidad de salida teórica máxima del sistema, calculada bajo condiciones nominales, asciende a proceso aproximadamente cuatro mil seiscientas unidades por turno, de las cuales se obtiene un rendimiento real medio en torno a las dos mil ochocientas unidades por turno, equivalente a una utilización de la capacidad cercana al sesenta por ciento.

Marco teórico-operacional: Factory Physics

Factory Physics constituye un marco teórico unificador que describe el comportamiento de los sistemas productivos mediante leyes deterministas y probabilísticas que gobiernan tres variables fundamentales: el throughput (TH), el tiempo de ciclo (CT) y el inventario en o WIP (Hopp & Spearman, 2008). La relación fundamental entre estas tres variables se expresa a través de la Ley de Little (Little, 1961), que en su forma de equilibrio establece que, para un sistema estable observado durante un período suficientemente largo, el inventario promedio en proceso es igual al producto del throughput promedio por el tiempo de ciclo promedio:

Ley de Little: Establece la relación matemática de equilibrio a largo plazo:

$$WIP = TH \times CT \quad (1)$$

A partir de esta identidad, Hopp y Spearman (2008) definen el concepto de best-case performance, el cual representa el desempeño máximo alcanzable en ausencia de variabilidad aleatoria. Este desempeño está delimitado por dos cantidades físicamente determinadas: la tasa del cuello de botella, denotada r_b , y el tiempo de proceso bruto T_0 , definido como la suma de los tiempos de operación efectivos sin esperas.

Desempeño en el Caso Ideal (Best-Case Performance): representa el límite superior del sistema en ausencia total de variabilidad. Está gobernado por la tasa del cuello de botella y el tiempo de proceso bruto. A partir de estos, se define el WIP Crítico como la cantidad mínima de inventario necesaria en la línea para alcanzar el máximo throughput sin generar tiempos muertos de espera WIP crítico:

$$W_0 = r_b \times T_0$$

Sobre la base de este marco se definen tres índices de eficiencia adimensionales que cuantifican qué tan cerca se encuentra el desempeño real del desempeño teórico best-case (Hopp & Spearman, 2021):

Eficiencias Adimensionales (Norma ISO 22400-2): Permiten normalizar el rendimiento real frente a las fronteras teóricas ideales:

$$\eta_{TH} = TH_{real} / TH_{best} \quad (2)$$

(eficiencia de throughput)

$$\eta_{CT} = CT_{best} / CT_{real} \quad (3)$$

(eficiencia de tiempo de ciclo)

$$\eta_{WIP} = W0 / WIP_{real} \quad (4)$$

(eficiencia de inventario en proceso)

Los tres índices se acotan al intervalo cerrado [0, 1] y son interpretables directamente como porcentajes de aprovechamiento. La norma ISO 22400-2 (2014) reconoce a estos cocientes como indicadores fundamentales de gestión de operación y desempeño de manufactura. En el presente estudio, η_{TH} se adopta como la métrica primaria de desempeño lo que compara lo que realmente produces con lo que deberías producir en condiciones ideales, dado que captura simultáneamente el efecto combinado de la variabilidad de procesamiento, los rechazos de calidad y la disponibilidad de operarios sobre la productividad observable.

Modelado estocástico de las variables del proceso

La selección de las distribuciones de probabilidad se realizó atendiendo a la naturaleza física de cada variable y a la evidencia empírica disponible en la literatura de

modelado de operaciones (Law, 2015; Ross, 2013). Tres familias de distribuciones se emplearon en el modelo:

Distribución Gamma para tiempos de proceso

Los tiempos de evacuación de las polivalentes y los tiempos de empaque por canasta se modelaron mediante distribuciones Gamma. Esta elección se fundamenta en tres propiedades deseables de la familia Gamma: tiene soporte estrictamente positivo, lo cual es físicamente coherente con cualquier duración de tarea, presenta cola derecha asimétrica que captura adecuadamente los eventos de duración prolongada, y permite parametrizar de forma independiente la media y el coeficiente de variación al cuadrado (CV^2) mediante los parámetros de forma $\alpha = 1/CV^2$ y de escala $\beta = \mu \times CV^2$. Esta separación es particularmente útil porque permite explorar escenarios en los que se conserva la media de un proceso, pero se modifica únicamente su variabilidad, y viceversa.

Distribución Bernoulli para eventos discretos

Dos eventos discretos se modelaron como variables aleatorias Bernoulli independientes: el tipo de leche procesada en cada lote, con probabilidad pre_t de ser leche retentada, y la ocurrencia de rechazo por calidad en el control microbiológico, con probabilidad pre_j . Cuando una iteración registra un rechazo de calidad, el throughput real de esa réplica se anula, capturando así el efecto de las pérdidas catastróficas que dominan la cola izquierda de la distribución de η_{TH} .

Distribución Uniforme para variables exógenas

La disponibilidad de operarios por turno se modeló como una variable aleatoria uniforme discreta entre los valores mínimo y máximo observados en cada escenario, reflejando el ausentismo aleatorio asociado a permisos, incapacidades y rotaciones. Las pausas individuales de lavado de manos se modelaron como una distribución uniforme y continua entre 0,5 y 1,0 minutos por evento. La elección de la distribución uniforme se justifica por la ausencia de información a priori que privilegie un valor específico dentro del rango admisible, criterio consistente con el principio de máxima entropía aplicado a soportes acotados.

Definición de los escenarios de análisis

Se estructuraron seis escenarios que representan configuraciones operativas alternativas de la línea de producción. La definición de estos escenarios se realizó con el objetivo de cubrir tanto las condiciones de referencia como las palancas de mejora potenciales, con el fin de evaluar comparativamente su impacto sobre la eficiencia esperada y sobre el riesgo de cola. Los escenarios se describen en la Tabla 3.1.

Tabla 1 Configuración paramétrica de los seis escenarios simulados.

Escenario	μ_{evac} (min)	CV^2_{evac}	μ_{emp} (min)	pret	prej	Operarios	Polivalentes	Turno (h)
Base actual	75	0,40	3,5	0,30	0,05	13–18	4	8

Escenario	μ_{evac} (min)	CV^2_{evac}	μ_{emp} (min)	pret	prej	Operarios	Polivalentes	Turno (h)
Optimista	65	0,12	3,0	0,10	0,02	17–18	4	8
Pesimista	105	1,00	4,2	0,65	0,12	10–14	3	8
100% retentada	120	0,20	3,5	1,00	0,05	13–18	4	8
CONWIP activo	75	0,20	3,3	0,30	0,05	14–18	4	8
Turno ampliado (12h)	75	0,40	3,5	0,30	0,05	13–18	4	12

El escenario base actual reproduce las condiciones operativas vigentes y sirve como referencia. El escenario optimista representa una operación con baja variabilidad resultado, por ejemplo, de programas exitosos de estandarización del trabajo y de reducción del coeficiente de variación de los tiempos de evacuación, sin requerir inversión adicional de capital. El escenario pesimista representa una operación degradada con alta variabilidad y elevada proporción de leche retentada, asociada a fallas en el suministro y al desgaste operativo. Los escenarios 100% retentada, CONWIP activo y Turno ampliado corresponden a intervenciones operativas sujetas a inversión: garantizar suministro homogéneo de leche retentada implementando un acuerdo logístico exclusivo, implantar un sistema de control de inventario en proceso tipo CONWIP siguiendo a Spearman et al. (1990), y prolongar la jornada productiva a doce horas mediante horas extras programadas. Los costos asociados a cada intervención se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 2 Costos de implementación de las intervenciones evaluadas.

Intervención	Costo anualizado (MM COP)	Naturaleza del costo
100% retentada	5	Sobrecosto logístico de suministro
CONWIP activo	8	Tableros, capacitación, rediseño de flujo
Turno ampliado	30	Recargo laboral por hora extra programada

Simulación Monte Carlo

La simulación Monte Carlo es un método numérico que estima propiedades estadísticas de un sistema mediante la generación repetida de muestras de variables aleatorias y el cálculo, en cada réplica, de las funciones de interés (Ross, 2013). Su justificación teórica reside en la Ley Fuerte de los Grandes Números, que garantiza la convergencia casi segura del promedio muestral hacia la esperanza poblacional, y en el Teorema del Límite Central, que permite construir intervalos de confianza para los estimadores con tasa de convergencia $O(N^{-1/2})$ (Boyle et al., 1997; L'Ecuyer, 2012). En el presente estudio se ejecutaron cinco mil réplicas independientes ($N = 5000$) por escenario, lo que arroja un total de treinta mil iteraciones acumuladas. La generación de muestras de las distribuciones Gamma se realizó mediante la función `gamrnd` de MATLAB, que implementa el algoritmo de Marsaglia y Tsang para $\alpha \geq 1$ y un método de aceptación-rechazo para $\alpha < 1$. La generación de muestras Bernoulli y Uniformes se basó en transformaciones inversas a partir de un generador uniforme estándar tipo Mersenne Twister con semilla controlada, garantizando reproducibilidad. La adecuación del tamaño

muestral $N = 5000$ se verificó a posteriori mediante curvas de convergencia de la media acumulada, las cuales se reportan en la sección de resultados. Para cada réplica se computan las siguientes cantidades en el orden indicado: el tiempo efectivo de evacuación ajustado por el tipo de leche, las tasas de cuello de botella en evacuación y empaque, la tasa efectiva del cuello de botella global como mínimo de las dos anteriores, el throughput y tiempo de ciclo best-case según las fórmulas de Factory Physics, el throughput real penalizado por la variabilidad mediante un factor multiplicativo aleatorio, el tiempo de ciclo real, el WIP real obtenido por la Ley de Little, y finalmente los tres índices de eficiencia η_{TH} , η_{CT} y η_{WIP} .

Métricas de decisión y análisis comparativo

La comparación entre escenarios se basó en cinco métricas complementarias, cada una de las cuales captura una dimensión distinta del desempeño y el riesgo. La elección conjunta de las cinco se justifica porque ningún indicador único agota la información contenida en una distribución de probabilidad: la media describe el desempeño esperado, pero ignora la dispersión, el percentil informa sobre eventos típicos, pero no sobre eventos extremos, y la cola izquierda gobierna las pérdidas que el operador efectivamente sufrirá en los peores turnos.

Esperanza y desviación estándar de η_{TH}

La esperanza $E[\eta_{TH}]$ estima el desempeño promedio de largo plazo, mientras que la desviación estándar o cuantifica la volatilidad turno a turno. Una varianza alta implica

baja predictibilidad, lo que dificulta la planificación de la cadena de suministro y puede traducirse en niveles de inventario de seguridad excesivos (Stadtler & Kilger, 2015).

Probabilidad de cumplir el umbral operativo

La probabilidad $P(\eta_{TH} \geq 0,85)$ cuantifica la fracción de turnos en los que la línea alcanza o supera el ochenta y cinco por ciento de la eficiencia teórica. Este umbral fue definido por la dirección de operaciones como el nivel a partir del cual se considera que la línea opera de manera satisfactoria.

Conditional Value-at-Risk (CVaR)

El CVaR, también conocido como Expected Shortfall, se define como la esperanza condicional de la variable de interés condicionada al evento de que ésta caiga en la cola adversa de su distribución. Formalmente, para un nivel de confianza α y una variable X cuyas realizaciones bajas son las desfavorables:

$$CVaR_{\alpha}(X) = E[X | X \leq VaR_{\alpha}(X)] \quad (5)$$

Donde $VaR_{\alpha}(X)$ corresponde al percentil $(1 - \alpha)$ de la distribución de X . A diferencia del Value-at-Risk clásico, el CVaR satisface las cuatro propiedades de una medida coherente de riesgo: monotonicidad, subaditividad, homogeneidad positiva e invarianza por traslaciones según la axiomatización de Artzner et al. (1999) y la formalización posterior de Rockafellar y Uryasev (2000, 2002). En el presente estudio se utilizó $\alpha = 95 \%$, de

modo que el CVaR95% representa el desempeño promedio en el cinco por ciento de los peores turnos. Un CVaR alto indica que, incluso en los escenarios desfavorables, la línea conserva una eficiencia razonable, mientras que un CVaR bajo señala fragilidad operativa.

Score compuesto multicriterio

Para integrar las dimensiones anteriores en un único criterio de ordenamiento se construyó un score compuesto inspirado en la teoría de selección de portafolios de Markowitz (1952), que pondera linealmente desempeño y riesgo:

$$\text{Score} = w_{\mu} \cdot E[\eta] + w_c \cdot \text{CVaR} + w_p \cdot P(\eta \geq 0,85) - \lambda \cdot w_{\sigma} \cdot \sigma + 0,05 \cdot \text{ROI}_{\text{norm}} \quad (6)$$

Los pesos adoptados fueron $w_{\mu} = 0,35$, $w_c = 0,30$, $w_p = 0,20$ y $w_{\sigma} = 0,15$, con un coeficiente de aversión al riesgo $\lambda = 0,8$ que refleja una postura moderadamente conservadora del decisor. Estos pesos se calibraron en consenso con el equipo de trabajo y son consistentes con las recomendaciones de Slack et al. (2019) para la priorización de objetivos de operaciones en industrias de proceso continuo.

ROI estocástico

El retorno sobre la inversión se calculó como el cociente entre la ganancia anual incremental esperada respecto al escenario base obtenida como $\Delta E[\eta_{\text{TH}}]$ multiplicado por las unidades de referencia por turno, la ganancia neta unitaria y los doscientos

cincuenta turnos productivos al año y el costo anualizado de implementación. Se adoptaron como parámetros financieros una ganancia neta de COP \$1600 por unidad y una producción de referencia de 2800 unidades por turno. Un ROI igual a la unidad indica que la inversión se recupera exactamente en un año; valores inferiores a uno indican que la mejora esperada en throughput no compensa el desembolso requerido.

Dominancia estocástica de primer orden

Dos escenarios A y B se comparan mediante sus funciones de distribución acumulada (CDF). Se dice que A domina estocásticamente a B en primer orden si la CDF de A está siempre a la derecha de la de B es decir, $F_A(x) \leq F_B(x)$ para todo x , con desigualdad estricta para algún x (Levy, 1992). Cuando se cumple esta condición, todo decisor con preferencias monótonas crecientes prefiere A y B, independientemente de su grado de aversión al riesgo. Cuando las CDFs se cruzan, la decisión depende del perfil específico de aversión, lo que justifica recurrir al score compuesto. Adicionalmente, se construyó la matriz de dominancia pareada $P(\eta_i > \eta_j)$ sobre las réplicas Monte Carlo, que ofrece un complemento empírico al criterio teórico.

Implementación computacional

El modelo se codificó íntegramente en MATLAB R2025b, organizado en un archivo único de aproximadamente novecientas ochenta líneas estructurado en diecisiete bloques temáticos. La arquitectura del código separa los parámetros del análisis de decisión editables por el usuario de los parámetros de cada escenario y del motor de

simulación, lo que facilita la replicación, la auditoría y la extensión a nuevas configuraciones. La generación de figuras se automatizó mediante funciones nativas de visualización, produciendo en total diez figuras y dos tablas de diagnóstico en consola que permiten verificar la consistencia de los resultados antes de su interpretación.

Resultados y Discusión

Resultados

Este capítulo presenta los resultados de la simulación Monte Carlo organizados en nueve secciones. La primera valida la convergencia del estimador y la solidez de la base muestral. Las secciones segundas a la quinta describen la estructura de distribución de los indicadores de eficiencia. Las secciones sextas a octava analizan el riesgo operativo desde tres perspectivas complementarias cola adversa, frontera riesgo-rendimiento y dominancia estocástica, y la novena consolida los hallazgos económicos a través del ROI estocástico y el ranking compuesto.

Convergencia del estimador Monte Carlo

Las curvas de convergencia de la media acumulada de η_{TH} (Figura 4.1) muestran que los seis escenarios alcanzan un régimen estacionario antes de las dos mil iteraciones, y permanecen estables hasta el final del experimento. La amplitud de oscilación residual al término de las cinco mil iteraciones es inferior a 0,3 puntos porcentuales en todos los casos, lo que confirma que el tamaño muestral seleccionado es suficiente para estimar la media con precisión adecuada. El escenario pesimista converge al valor más bajo, en torno a 73 %, mientras que los demás escenarios convergen en una banda estrecha entre el 78 % y el 81%, anticipando que las diferencias entre escenarios alternativos son sutiles.

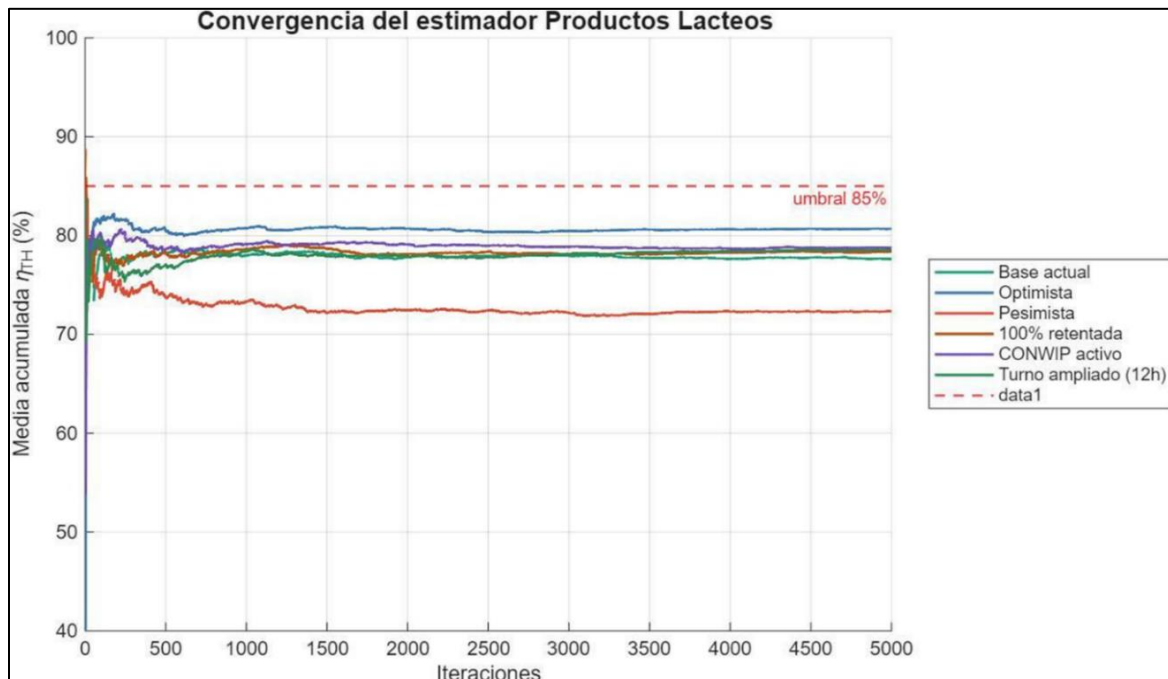


Ilustración 1 Convergencia de la media acumulada de η_{TH} a lo largo de las 5000 iteraciones por escenario.

Distribución de la eficiencia de throughput

Los histogramas de η_{TH} por escenario (Figuras 4.2a a 4.2f) revelan una estructura bimodal en todos los casos: un primer modo concentrado cerca de cero, correspondiente a las réplicas en las que un rechazo de calidad anula el throughput de la jornada, y un segundo modo principal aproximadamente normal centrado entre el 80 % y el 85 %. La masa de probabilidad asociada al modo cero refleja directamente el parámetro prej de cada escenario: 4,4 % en Base, 1,7 % en optimista, 11,4 % en pesimista, 5,0 % en 100% retentada, 4,8 % en CONWIP y 5,4 % en turno ampliado. Las medianas observadas se ubicaron en 84,9 % (base), 82,4 % (optimista), 80,9 % (pesimista), 81,7 % (100 %

retentada), 81,6 % (CONWIP) y 84,7 % (turno ampliado). La probabilidad de cumplir el umbral del 85 % varía entre el 35,2 % del escenario pesimista y el 40,5 % del escenario optimista; el resto de las configuraciones se ubica en una banda muy estrecha entre 37,5 % y 38,4 %.

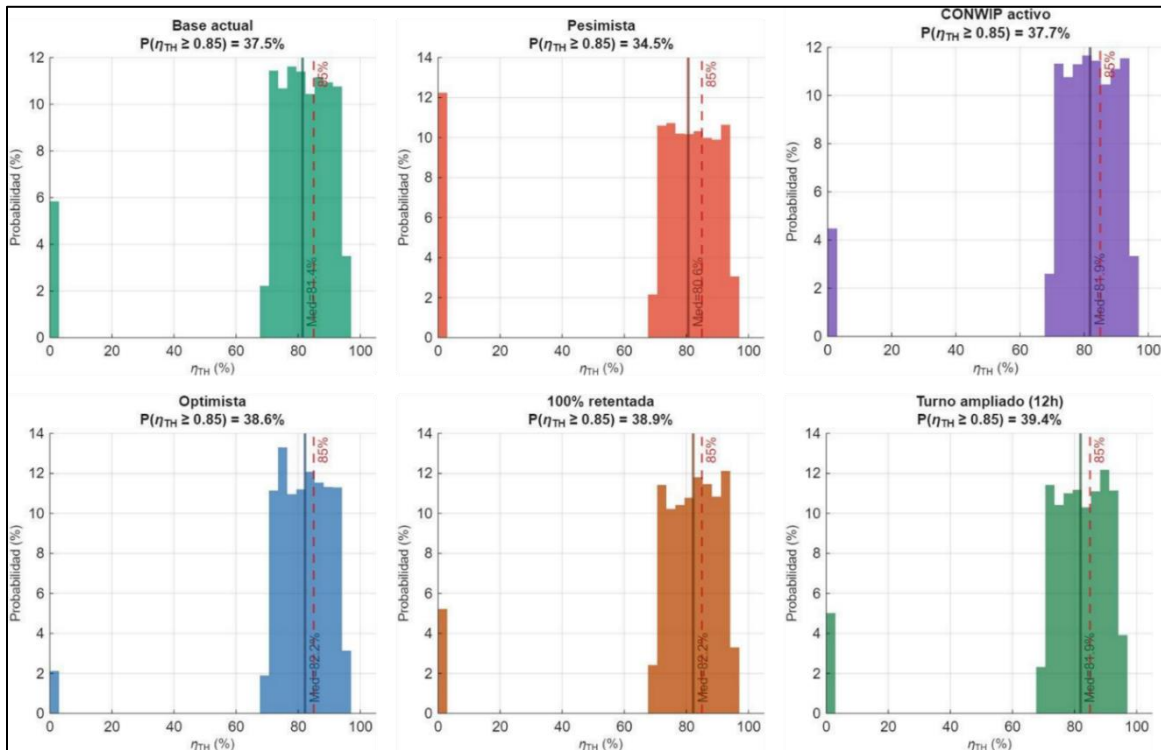


Ilustración 2 Histogramas de η_{TH} por escenario, con marca de mediana y línea de referencia del umbral del 85 %.

El boxplot comparativo de η_{TH} (Figura 4.3) confirma la similitud estadística entre los seis escenarios en términos de tendencia central y dispersión, con cuartiles inferior y superior aproximadamente entre 75 % y 88 %. Los bigotes alcanzan el 95 % en el extremo superior

y el 70 % en el inferior, lo que sugiere que la línea es capaz de operar tanto por encima del umbral objetivo como por debajo de él en proporciones similares.

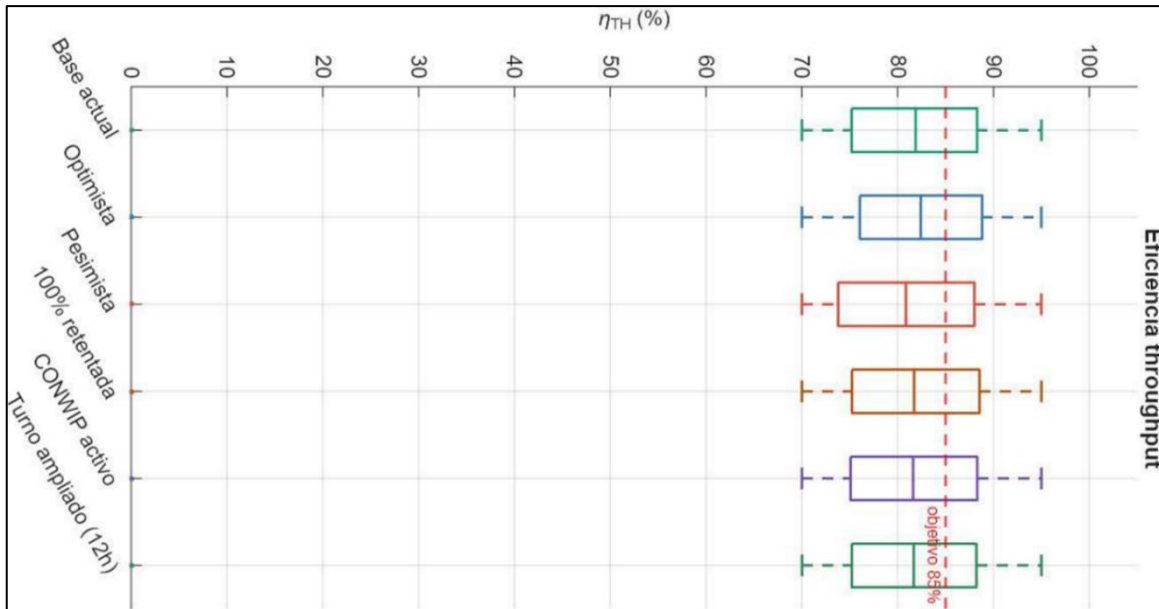


Ilustración 3 Boxplot comparativo de η_{TH} para los seis escenarios; línea roja punteada en el objetivo del 85 %.

Distribución de las eficiencias η_{CT} y η_{WIP}

A diferencia de η_{TH} , la eficiencia de tiempo de ciclo (Figura 4.4) muestra diferencias marcadas entre escenarios. La mediana de η_{CT} en el escenario optimista alcanza el 88 %, sustancialmente por encima de los demás, mientras que el escenario pesimista cae al 56 %. Los escenarios 100 % retenada y CONWIP activo se ubican en una posición intermedia ventajosa, con medianas de 80 % y 83 % respectivamente. Esta divergencia confirma que el coeficiente de variación es la palanca dominante para η_{CT} ,

dado que la penalización por variabilidad η_{CT} se construye explícitamente como una función creciente de los CV^2 de las distribuciones Gamma.

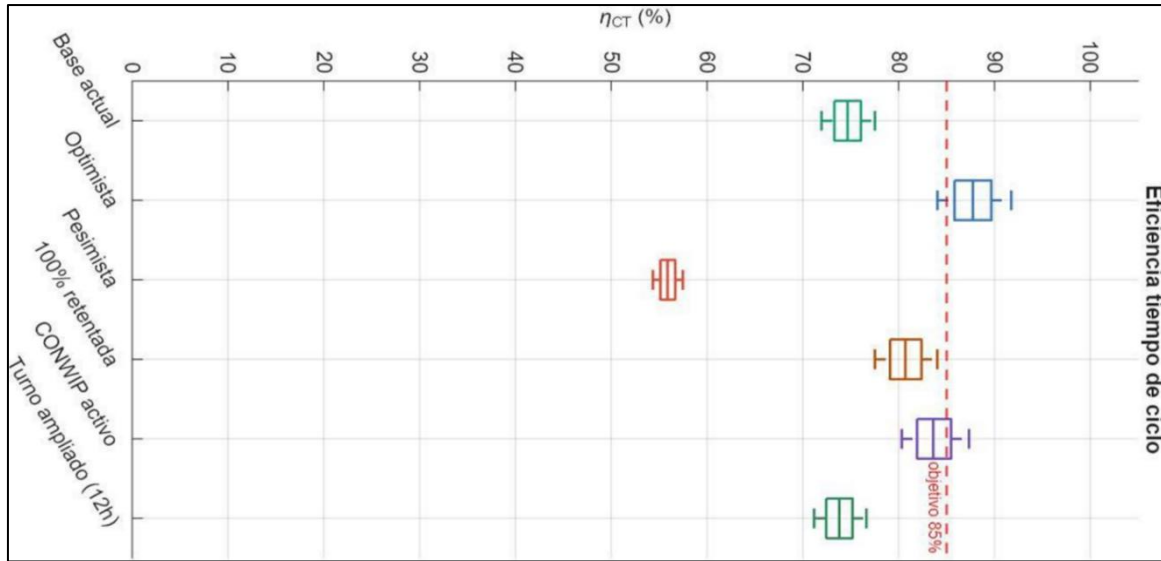


Ilustración 4 Boxplot comparativo de η_{CT} .

La eficiencia de WIP (Figura 4.5) se mantiene en valores cercanos al 100 % en todos los escenarios, con dispersión prácticamente nula. Este resultado es coherente con el diseño físico de la línea, que opera con un número fijo de cuatro lotes simultáneos en sistema y un WIP crítico calibrado a esa misma magnitud. En consecuencia, el inventario en proceso no constituye una palanca de mejora explotable en la configuración actual.

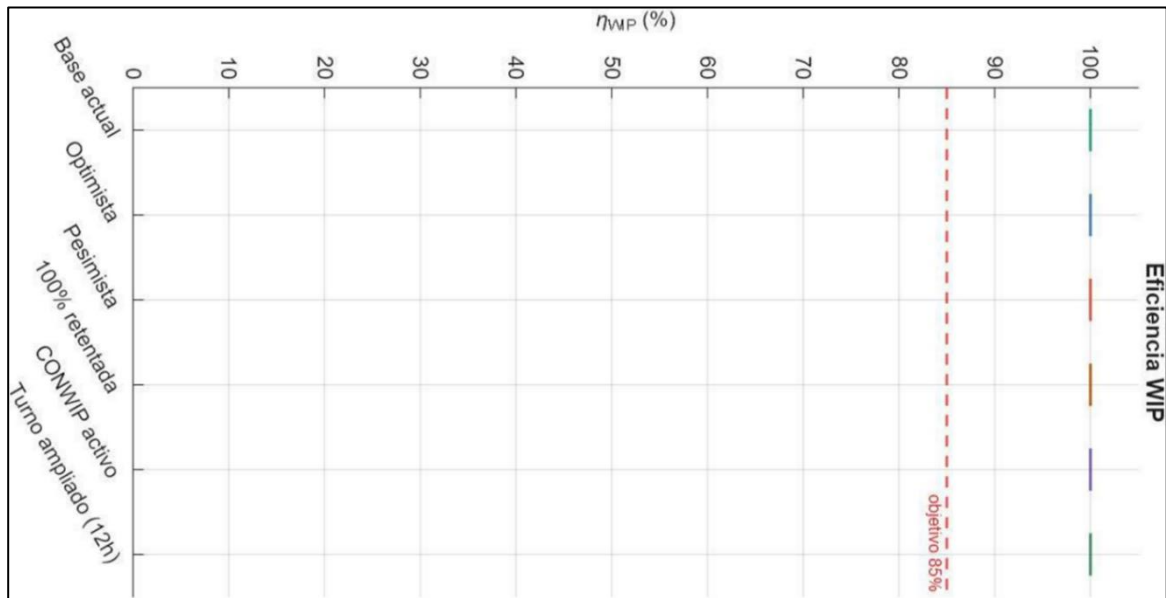


Ilustración 5 . Boxplot de η_{WIP} — la línea opera ya en el WIP crítico en todos los escenarios.

Identificación del cuello de botella

La Figura 4.6 desglosa, para cada escenario, la probabilidad empírica de que el cuello de botella global sea la etapa de evacuación polivalente o la etapa de empaque. En cinco de los seis escenarios, la polivalente es el cuello de botella en aproximadamente el 100 % de las réplicas; en el escenario pesimista lo es en el 92,8 %, mientras que el empaque domina solo en el 7,2 % residual de las iteraciones de ese escenario. Este resultado es contundente: la etapa de empaque tiene capacidad sobrante en prácticamente todas las condiciones operativas plausibles, y por lo tanto cualquier inversión orientada a aumentar la capacidad de empaque sería marginal.

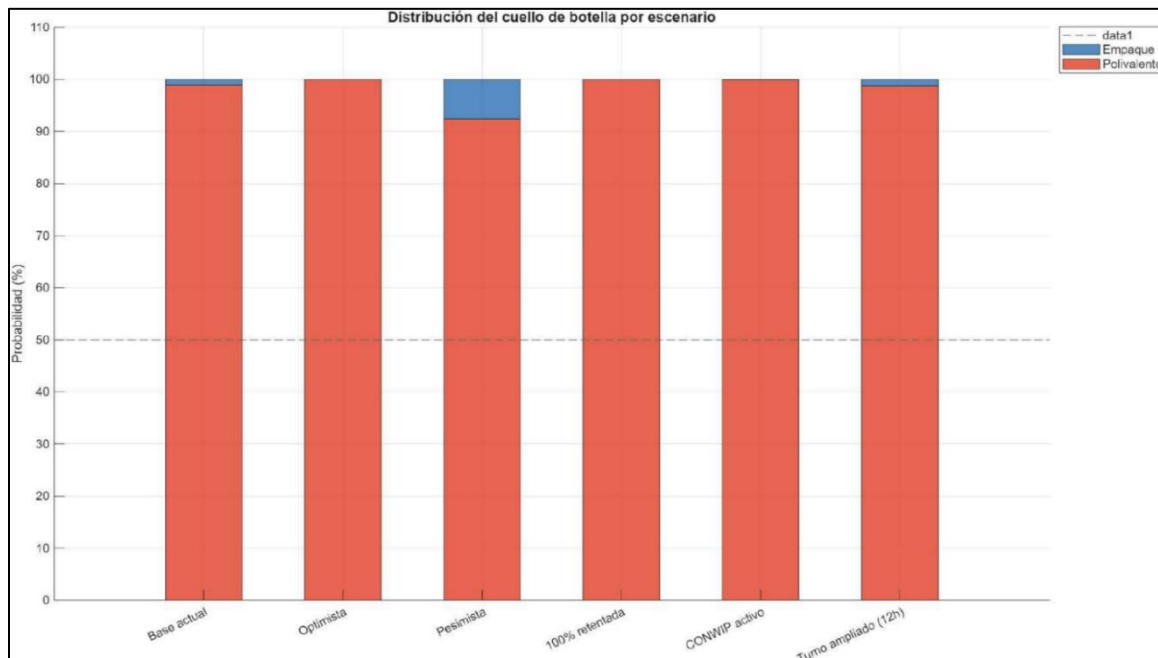


Ilustración 6 Probabilidad empírica del cuello de botella por escenario (apilada: polivalente vs. empaque).

Relación entre WIP y eficiencia de throughput

Los diagramas de dispersión WIP– η_{TH} (Figuras 4.7a a 4.7f) muestran una relación lineal positiva fuerte entre el inventario en proceso y la eficiencia de throughput en los seis escenarios. La nube de puntos se concentra en una banda estrecha que parte aproximadamente de WIP = 3,3 lotes con η_{TH} = 70 %, y asciende hasta WIP = 5,0 lotes con η_{TH} = 95 %. Esta forma es la huella característica de un sistema operando en la curva pre-asintótica de la relación de Little (Hopp & Spearman, 2008): el throughput crece de manera aproximadamente proporcional al WIP hasta acercarse al WIP crítico, momento en el cual la curva se aplana. La línea en estudio se encuentra precisamente en el codo de esta

curva, lo que explica por qué pequeños desplazamientos de WIP producen variaciones significativas de η_{TH} .

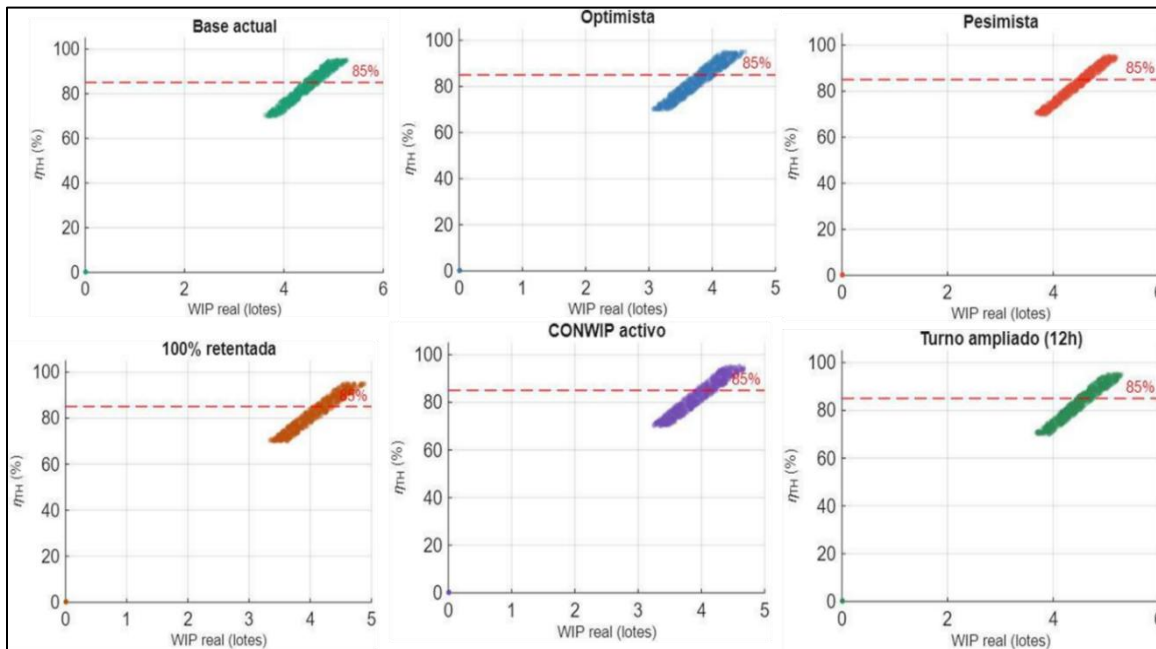


Ilustración 7 Dispersiones WIP real vs. η_{TH} para los seis escenarios; línea de referencia en el 85 %.

Análisis de riesgo: CVaR y heatmap de percentiles

El CVaR₉₅ % por escenario (Figura 4.8) presenta un contraste pronunciado: el escenario optimista alcanza un CVaR de 46,2 %, lo que significa que incluso en el cinco por ciento de los peores turnos la línea opera con una eficiencia promedio cercana a la mitad del best-case. El escenario base actual registra un CVaR de 7,6 %, CONWIP activo un 2,8 %, y los escenarios 100 % retentada, turno ampliado y pesimista convergen prácticamente a 0 %. Estos valores reflejan la masa de probabilidad concentrada en el

modo cero por causa de los rechazos de calidad y, en el caso del escenario pesimista, también por las realizaciones extremas de la cola Gamma de tiempos de evacuación.

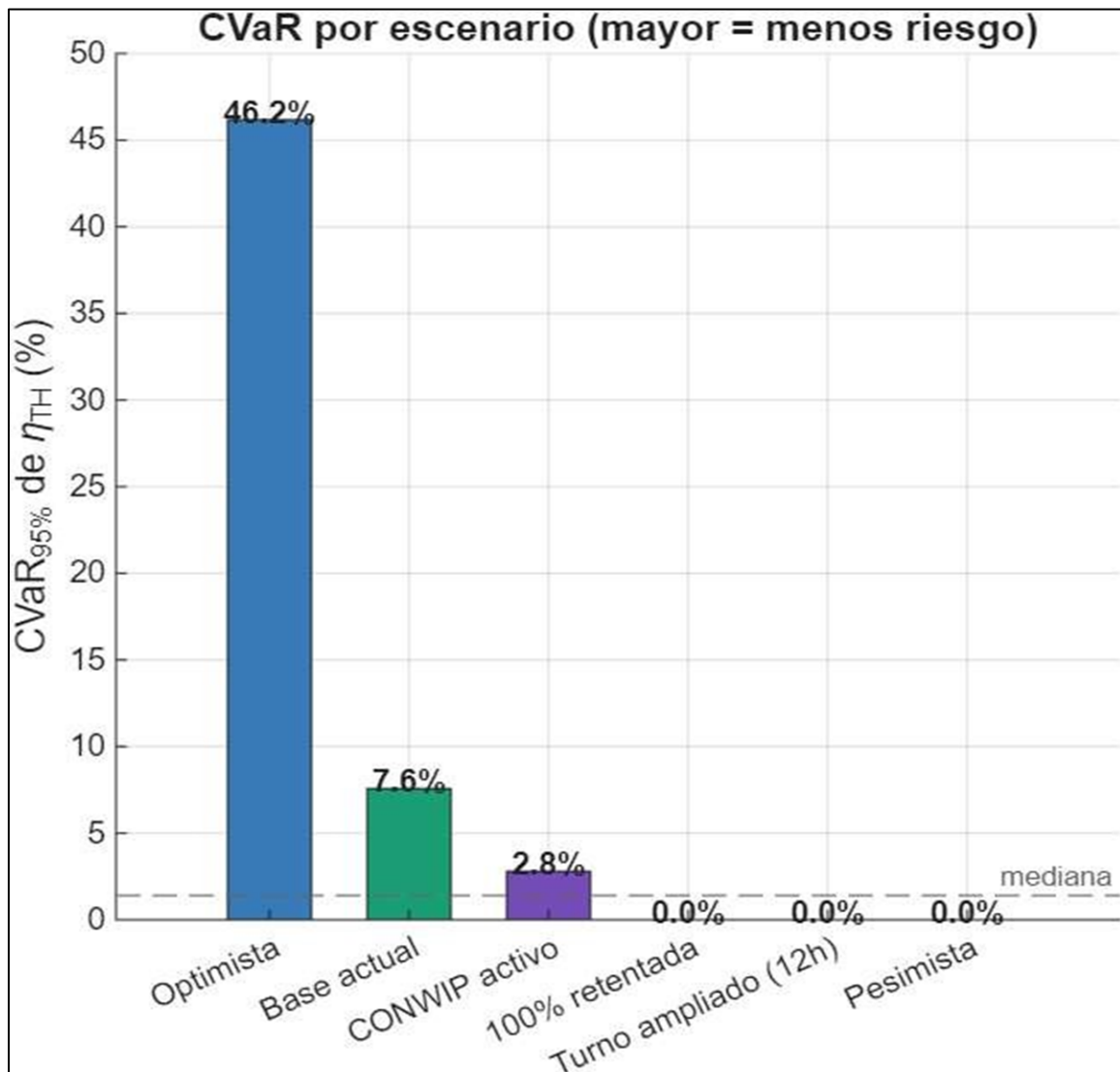


Ilustración 8 CVaR_95 % de η_{TH} por escenario; valores altos indican menor riesgo de cola adversa.

El heatmap de percentiles (Figura 4.9) ofrece una vista complementaria al mostrar P5, P10, P25, P50, P75, P90 y P95 de η_{TH} para cada escenario. Los percentiles altos (P90 y P95) son virtualmente idénticos entre los seis escenarios, ubicándose alrededor del 90 % y 91 % respectivamente. Las diferencias se concentran en los percentiles bajos: el P5 del escenario Pesimista no alcanza siquiera al rango representable dada la masa concentrada en cero, mientras que en el resto de los escenarios oscila entre 70,0 % y 70,8 %.

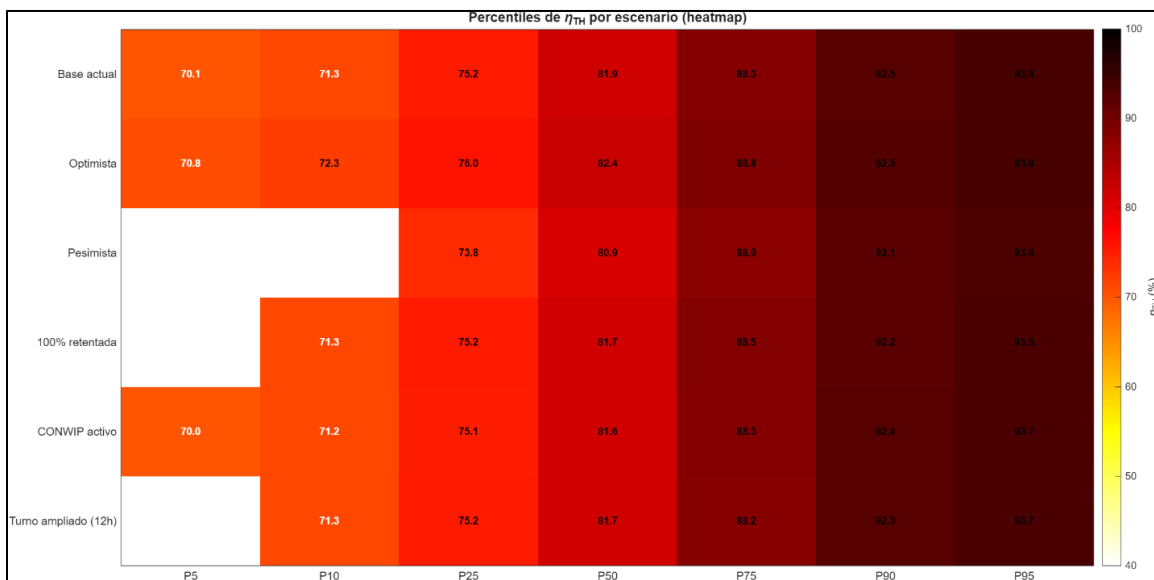


Ilustración 9 Heatmap de percentiles de η_{TH} (P5 a P95) por escenario.

Frontera riesgo-rendimiento

La Figura 4.10 representa cada escenario como un punto en el plano ($E[\eta_{TH}]$, $CVaR_{95}(\%)$), con tamaño proporcional a la volatilidad σ . Esta visualización es análoga a la frontera de eficiencia de Markowitz (1952) aplicada al espacio de operaciones. El escenario optimista es el único que se ubica claramente por encima y a la derecha del

cono de la región preferida, alcanzando simultáneamente la mayor esperanza y el mayor CVaR. Los escenarios base actual, CONWIP activo y turno ampliado se concentran en una nube apretada cerca del extremo derecho del eje horizontal, pero con CVaR cercano a cero, indicando alto rendimiento esperado pero alta exposición a la cola. Los escenarios 100 % retentada y pesimista quedan dominados en ambas dimensiones.

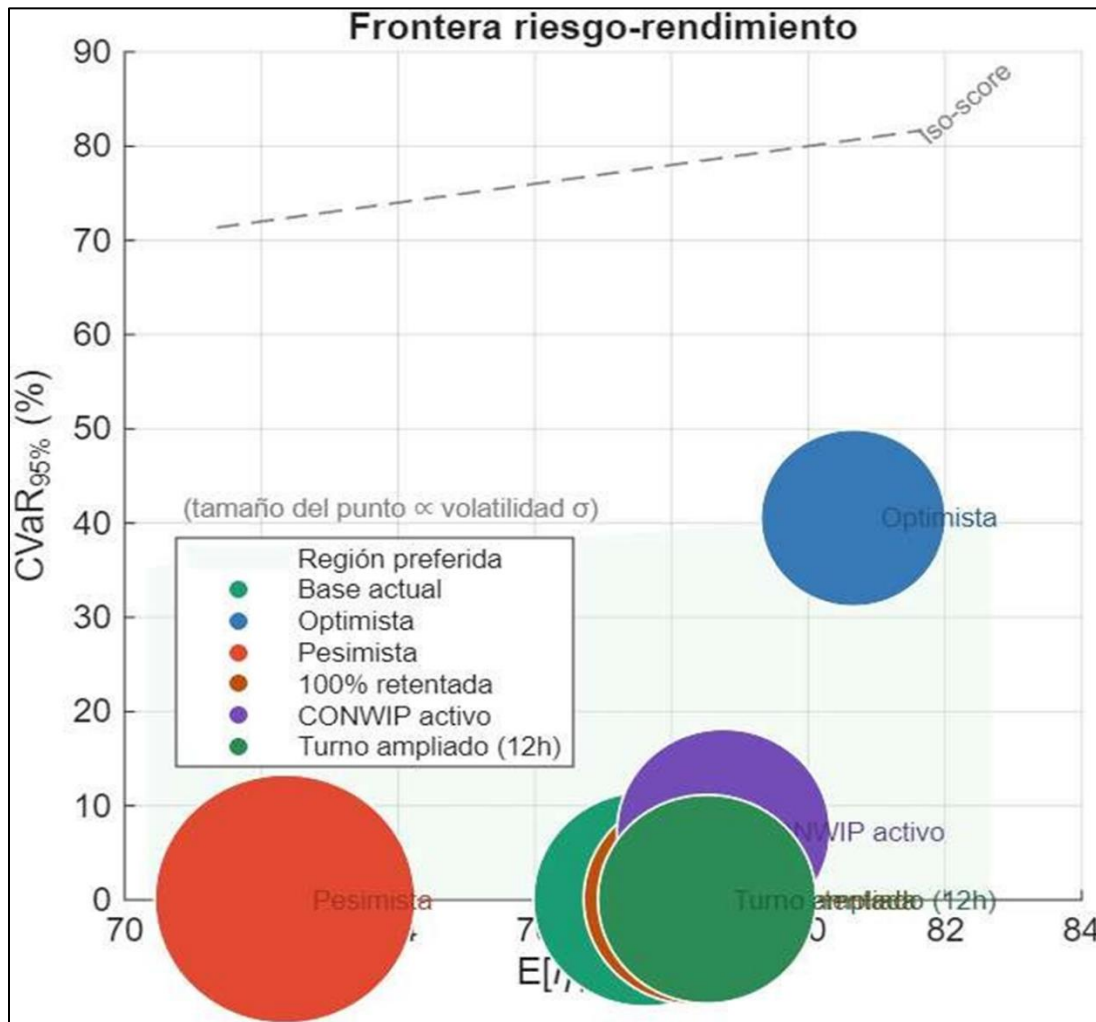


Ilustración 10 Frontera riesgo-rendimiento — CVaR_{95%} vs. $E[\eta TH]$ por escenario; tamaño del punto proporcional a σ .

Dominancia estocástica

Las funciones de distribución acumulada de η_{TH} para los seis escenarios (Figura 4.11) son visualmente similares a partir del 85 %, pero presentan diferencias relevantes en la cola izquierda. El escenario pesimista parte de $F(0) \approx 11 \%$, frente a un $F(0) \approx 5 \%$ en los demás. La curva del escenario optimista cruza por debajo de las otras a lo largo de la mayor parte del soporte, lo que sugiere dominancia parcial pero no absoluta. La matriz empírica de dominancia pareada $P(\eta_i > \eta_j)$ confirma esta observación: el escenario optimista supera a los demás con probabilidades entre 52 % y 56 %, mientras que el pesimista es superado por los demás con probabilidades entre 46 % y 50 %. Las diferencias entre base, CONWIP activo y turno ampliado son inferiores a 2 puntos porcentuales, lo que indica un empate técnico estadístico entre estas tres alternativas en términos de dominancia.

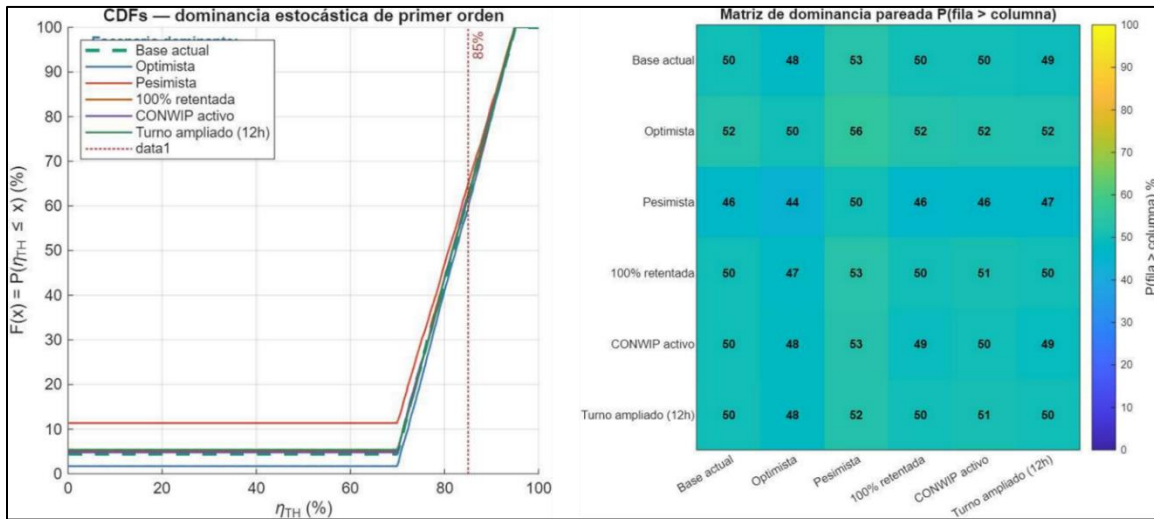


Ilustración 11 CDFs de η_{TH} por escenario y matriz de dominancia pareada $P(\eta_{fila} > \eta_{columna})$.

Análisis económico: ROI y ranking compuesto

El análisis financiero (Figura 4.12) muestra que las tres intervenciones evaluadas producen una ganancia anual esperada negativa respecto al escenario base: 34 millones COP para 100 % retentada, 26 millones COP para CONWIP activo y 57 millones COP para Turno ampliado de doce horas. Esto se debe a que la mediana de η_{TH} de cada intervención es ligeramente inferior a la del escenario base, y la ganancia anual se calcula a partir del diferencial de la media respecto al base. Cuando estos diferenciales se enfrentan a los costos de implementación, los ROI resultantes son 6,86x para 100 % retentada, 3,26x para CONWIP activo y 1,91x para turno ampliado, todos por debajo del umbral mínimo aceptable de 1,00x.

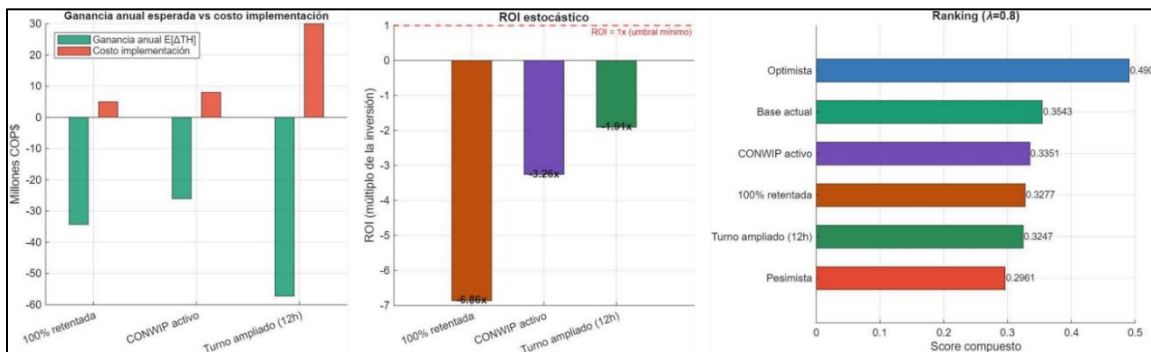


Ilustración 12 Ganancia anual esperada vs. costo de implementación, y ROI estocástico, por escenario con inversión.

El ranking por score compuesto (Figura 4.13) ordena los escenarios de la siguiente manera: optimista (0,4907), base actual (0,3543), CONWIP activo (0,3351), 100 % retentada (0,3277), turno ampliado (0,3247) y pesimista (0,2961). El escenario optimista lidera por

un margen cercano al 38 % respecto al segundo lugar, lo que es consistente con su posición destacada en la frontera riesgo-rendimiento. La diferencia entre el segundo y el quinto lugar es de apenas 0,03 puntos de score, lo que reafirma que las intervenciones de capacidad e inventario son sustancialmente equivalentes al escenario base en términos del criterio compuesto.

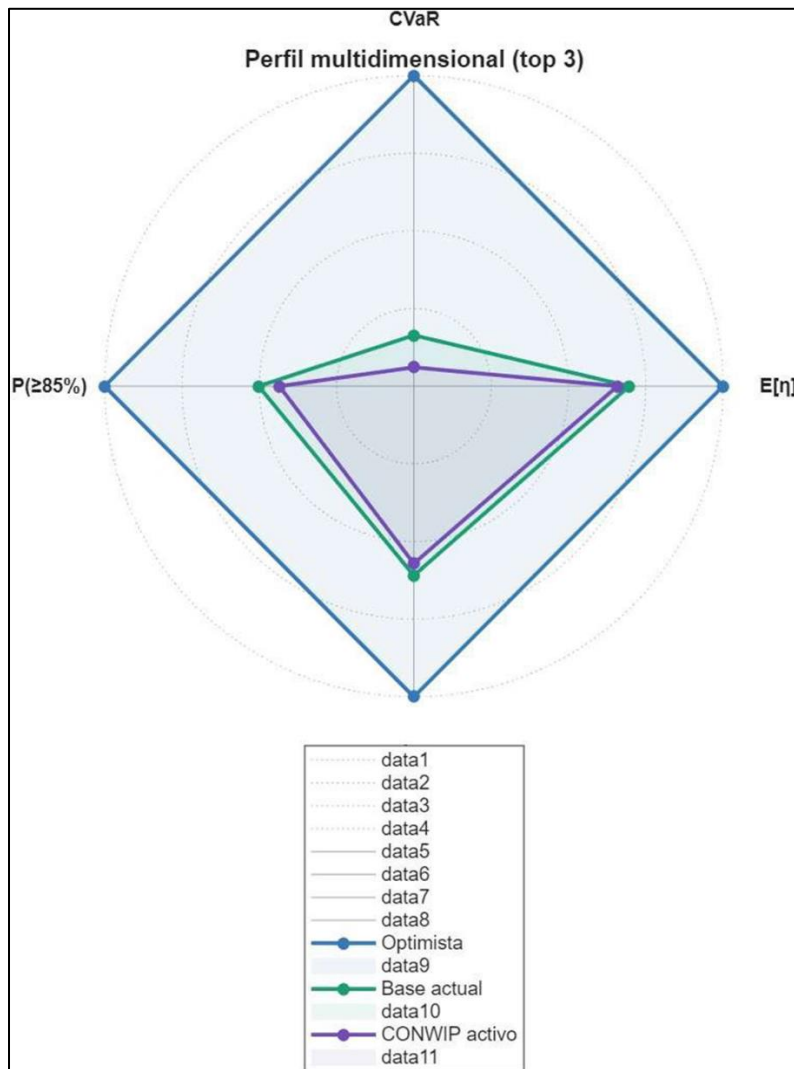


Ilustración 13 Ranking de escenarios por score compuesto y perfil radar multidimensional del top 3.

Discusión

Los resultados expuestos en el capítulo anterior configuran un panorama interpretativo cuya conclusión central, a primera vista paradójica, es que las intervenciones de capital evaluadas no producen mejoras significativas sobre el desempeño esperado de la línea, mientras que la palanca de mayor rendimiento la reducción de la variabilidad operativa no requiere inversión sustantiva. Esta sección discute los mecanismos que explican este hallazgo, lo contrasta con la literatura especializada y deriva implicaciones operativas concretas para la gestión de la línea de producción de quesitos recientemente adquirida.

La polivalente como cuello de botella estructural

El primer hallazgo robusto del estudio es la concentración casi absoluta del cuello de botella en la etapa de evacuación polivalente. En cinco de los seis escenarios la polivalente actúa como restricción en el cien por ciento de las réplicas, y en el escenario pesimista lo hace en el 92,8 %. Este resultado es relevante a la luz de la Teoría de las Restricciones (Goldratt, 1990), según la cual la productividad global de un sistema productivo está determinada exclusivamente por la capacidad de su recurso más restringido, y cualquier mejora en recursos no cuello de botella es operativamente irrelevante hasta tanto el cuello de botella sea explotado a su máxima capacidad. En términos prácticos, este resultado tiene tres consecuencias inmediatas. En primer lugar, la línea de empaque no demanda inversión adicional en el horizonte de planeación: su capacidad excede sistemáticamente la del cuello de botella aguas arriba, y por lo tanto los

recursos asignados a aumentar dicha capacidad no se traducirían en throughput adicional. En segundo lugar, los esfuerzos de mejora deben dirigirse a la polivalente, lo cual incluye intervenciones tales como reducción de tiempos de cambio de tipo de leche mediante metodologías SMED (Shingo, 1985), estandarización del trabajo de los operadores, mantenimiento preventivo enfocado en reducir averías no planificadas, y eventualmente la incorporación de una cuba polivalente adicional como ampliación de capacidad de mediano plazo. En tercer lugar, el monitoreo de indicadores debe centrarse en la utilización efectiva de la polivalente y en la variabilidad de sus tiempos de evacuación, no en métricas agregadas de la línea completa.

La variabilidad como palanca dominante

El segundo hallazgo central es que el escenario optimista caracterizado únicamente por una reducción de los coeficientes de variación de los tiempos de proceso, sin aumento de capacidad ni inversión de capital es el único que se posiciona inequívocamente en la frontera eficiente de la Figura 4.10 y el único que alcanza un CVaR sustancialmente positivo (46,2 %). Este resultado es coherente con la conocida relación VUT (Variabilidad-Utilización-Tiempo) de la teoría de colas (Hopp & Spearman, 2008), según la cual el tiempo de espera promedio en una estación crece de manera aproximadamente proporcional al cuadrado del coeficiente de variación de los tiempos de servicio. En sistemas operando cerca del cuello de botella como es el caso de la línea bajo estudio, el efecto de la variabilidad sobre el tiempo de ciclo y, por extensión, sobre el WIP necesario para sostener un throughput dado, se amplifica.

La diferencia entre el CV² de evacuación de 0,40 (escenario base) y el CV² de 0,12 (escenario optimista) es una distancia cubierta plausiblemente por programas de mejora basados en la estandarización de procedimientos, capacitación cruzada de operarios, monitoreo en línea de los tiempos de cuajado y desuerado, y protocolos rigurosos de cambio de turno. Estas intervenciones, en términos de la clasificación de Schmenner y Swink (1998), pertenecen al dominio de las teorías de la mejora continua y no requieren inversión de capital significativa, sino una reasignación de la atención gerencial hacia la disciplina operativa. Es relevante observar que la mediana de η TH del escenario optimista (82,4 %) es ligeramente inferior a la del escenario base (84,9 %), lo cual podría sugerir, en una lectura superficial, que el escenario optimista no es preferible. Esta lectura es engañosa: la superioridad del escenario optimista se manifiesta en la cola adversa de la distribución, no en la tendencia central. La masa de probabilidad concentrada cerca de cero en el escenario optimista es menor (1,7 % frente a 4,4 %), su CVaR es seis veces mayor, y la probabilidad de cumplir el umbral del 85 % es 2,6 puntos porcentuales superior. En síntesis: la baja variabilidad no eleva el techo del desempeño, pero sí eleva el piso, lo que en términos prácticos se traduce en una operación más predecible, con menor necesidad de inventarios de seguridad y menor exposición a faltantes en el servicio al cliente (Stadtler & Kilger, 2015).

Por qué las intervenciones de capital no rinden lo esperado Garantía de leche 100 % retentada

La intervención que garantiza el cien por ciento de leche retentada parte de la hipótesis de que la homogeneización del insumo reducirá la variabilidad agregada del proceso. Sin embargo, los resultados muestran que esta política produce el efecto contrario: la mediana de η_{TH} cae a 81,7 %, el CVaR colapsa a cero y el ROI es $-6,86x$. La razón es que la leche retentada, si bien es más predecible en términos de composición, requiere un tiempo de procesamiento sesenta por ciento mayor 120 minutos por evacuación frente a los 75 minutos nominales, lo cual desplaza la curva de capacidad de la polivalente hacia la zona de saturación. La menor variabilidad de los tiempos no compensa el aumento de la media, dado que el cuello de botella se vuelve más estrecho.

Implementación de CONWIP

La intervención CONWIP, propuesta originalmente por Spearman et al. (1990) como alternativa de control de flujo más robusta que el Kanban tradicional en sistemas con mezcla de productos variable, busca limitar el inventario en proceso a un nivel objetivo y dejar que el throughput emerja como variable de salida. Su mecanismo de acción es reducir el WIP innecesario y, por esa vía, acortar los tiempos de ciclo. En la línea bajo estudio, el resultado de la intervención es marginal: la mediana de η_{TH} baja a 81,6 % y el ROI es $-3,26x$. La explicación es que la línea ya opera muy cerca de su WIP crítico ($\eta_{WIP} \approx 100 \%$), y por lo tanto el margen de mejora que ofrece un mecanismo CONWIP es estructuralmente bajo. CONWIP es eficaz en sistemas con WIP excesivo o

con desbalances entre estaciones; ninguna de estas condiciones aplica aquí. La leve mejora en CV^2 de empaque (de 0,30 a 0,15) que se asocia al rediseño del flujo no compensa el costo de implementación de COP \$8 millones anuales.

Ampliación del turno a doce horas

La extensión de la jornada productiva a doce horas opera sobre una palanca distinta a las dos anteriores: no busca aumentar la eficiencia de cada hora trabajada, sino disponer de más horas. El modelo simulado muestra que esta lógica es contradictoria con el objetivo declarado de elevar η_{TH} , dado que η_{TH} es un cociente entre throughput real y throughput best-case, y ambos crecen aproximadamente en proporción cuando se aumenta el tiempo disponible. El ROI resultante es el menos desfavorable de las tres intervenciones (-1,91x), pero sigue por debajo del umbral. Adicionalmente, la prolongación de la jornada introduce factores de fatiga operativa no modelados explícitamente en el experimento, los cuales tenderían a degradar aún más el desempeño en la práctica. La literatura ergonómica reporta caídas de productividad del orden del 10–15 % al pasar de turnos de ocho a doce horas en operaciones manuales sostenidas (Folkard & Tucker, 2003).

Implicaciones para la operación de la línea adquirida

La inversión en la nueva línea de producción ya está realizada y constituye un costo hundido desde el punto de vista de la decisión actual. Lo que el presente estudio aporta no es, por tanto, una recomendación sobre la pertinencia de esa inversión cuestión

cerrada sino una guía sobre cómo extraer el máximo retorno operativo del activo ya instalado. En este sentido, los resultados sugieren cinco líneas de acción priorizadas:

1. Concentrar el plan de mejora continua en la reducción del CV^2 de los tiempos de evacuación de la polivalente. La meta debería fijarse en un CV^2 inferior a 0,20 en doce meses, alcanzable mediante estandarización del trabajo, instrucciones operativas detalladas y tableros visuales en piso.
2. Implementar un programa SMED orientado a los cambios entre tipos de leche, dado que el sobre costo temporal asociado al procesamiento de leche retentada es uno de los principales factores de variabilidad observados en el modelo. La meta sería reducir el sobre costo del 60 % actual al 35 %.
3. No invertir en capacidad adicional de empaque, pues constituye un recurso no restrictivo en todas las configuraciones evaluadas. Mantener la dotación actual de operarios en empaque y reasignar cualquier excedente a soporte de la polivalente.
4. Postergar las intervenciones de control de inventario tipo CONWIP hasta que la línea haya sido sometida durante al menos seis meses al programa de reducción de variabilidad. Una vez estabilizada la variabilidad, el efecto incremental de CONWIP podría ser reevaluado con datos reales.
5. Establecer un sistema de monitoreo de indicadores que reporte η_{TH} , η_{CT} y los percentiles 5 y 10 de η_{TH} de manera diaria. La medición sistemática del CVaR operativo es, en sí misma, una herramienta de gestión que permite detectar tempranamente derivas hacia la zona de fragilidad observada en los escenarios pesimista y retentada.

Limitaciones del estudio

El presente estudio reconoce cinco limitaciones metodológicas que deben tenerse en cuenta al interpretar sus resultados. Primero, las distribuciones paramétricas empleadas se calibraron con base en información histórica agregada, sin un proceso formal de bondad de ajuste como la prueba de Kolmogorov-Smirnov o de Anderson-Darling sobre datos a nivel de turno. Segundo, las correlaciones entre variables aleatorias, por ejemplo, entre el tipo de leche y la disponibilidad de operarios en días específicos de la semana se asumieron nulas, lo cual puede subestimar la varianza real de η_{TH} . Tercero, el modelo no incorpora dinámicas temporales de aprendizaje, fatiga o desgaste de equipos, que en horizontes largos pueden modificar las distribuciones supuestas. Cuarto, los costos de implementación de las intervenciones se tomaron como puntos determinísticos, cuando en la práctica son ellos mismos cantidades aleatorias con su propia distribución. Quinto, el umbral del 85 % para η_{TH} y los pesos del score compuesto fueron decididos por la dirección de operaciones; un análisis de sensibilidad de los resultados ante variaciones razonables de estos parámetros sería deseable como extensión natural del estudio.

Conclusiones

Describe acá las conclusiones Este trabajo propuso, ejecutó e interpretó una simulación Monte Carlo de cinco mil réplicas por escenario para evaluar el desempeño esperado de una línea de producción de quesitos bajo seis configuraciones operativas alternativas. La evaluación se realizó en el marco conceptual de Factory Physics, integrando métricas estadísticas (esperanza, desviación, percentiles), métricas de riesgo de cola (CVaR), métricas económicas (ROI estocástico) y criterios de dominancia estocástica de primer orden. A partir del análisis se obtienen las siguientes conclusiones.

Conclusiones sobre el desempeño esperado de la línea

La línea adquirida es capaz de operar en una banda de eficiencia de throughput entre el 70 % y el 95 %, con mediana cercana al 82–85 %, en todas las configuraciones operativas evaluadas. La probabilidad de cumplir el umbral del 85 % se sitúa entre el 35 % y el 41 %, lo que indica que el cumplimiento sistemático del objetivo operativo no es estructuralmente alcanzable con la configuración actual y requiere intervenciones específicas sobre los factores generadores de variabilidad. La eficiencia de WIP es prácticamente del cien por ciento en todos los escenarios, confirmando que la línea opera ya en el régimen del WIP crítico de Hopp y Spearman.

Conclusiones sobre el cuello de botella

La etapa de evacuación polivalente actúa como cuello de botella en al menos el 92,8 % de las realizaciones simuladas, y en el cien por ciento de las realizaciones de cinco de los seis escenarios. Esta condición es estructural y no se modifica por las intervenciones evaluadas. La etapa de empaque dispone de capacidad sobrante en prácticamente todas las condiciones operativas, por lo que cualquier inversión adicional en esta estación carece de fundamento técnico. La gestión de la línea debe concentrar atención, recursos y mediciones en la polivalente como restricción gobernante del sistema.

Conclusiones sobre las palancas de mejora

Las tres intervenciones de capital evaluadas garantía de leche cien por ciento retentada, implementación de CONWIP y ampliación del turno a doce horas presentan un retorno sobre la inversión negativo bajo los supuestos del modelo, con valores de $-6,86x$, $-3,26x$ y $-1,91x$ respectivamente. Por contraste, la palanca de reducción de la variabilidad de los tiempos de proceso representada por el escenario optimista produce mejoras tangibles en la cola adversa de la distribución (CVaR de 46,2 % frente a 7,6 % del Base) sin requerir inversión de capital. Esto sugiere que el plan de mejora de mayor rentabilidad esperada para la línea consiste en programas de estandarización del trabajo, SMED y mejora continua sobre la polivalente, antes que en aumentos de capacidad o cambios de política de inventario.

Conclusiones sobre el método empleado

El uso combinado de simulación Monte Carlo, Factory Physics y métricas de riesgo financiero como el CVaR demuestra ser una arquitectura analítica apropiada para la toma de decisiones de operaciones bajo incertidumbre. La integración de la cola de la distribución en el criterio de decisión permitió detectar diferencias entre escenarios que la sola comparación de medias o medianas habría ocultado. El score compuesto multicriterio probó ser sensible a la aversión al riesgo del decisor (parámetro λ) y suficientemente discriminante para producir un ranking estable de alternativas. La replicabilidad del experimento, garantizada por la semilla controlada del generador pseudoaleatorio, permite que el modelo sea utilizado como herramienta de soporte continuo a la decisión, recalibrable a medida que se acumulen datos operativos reales.

Recomendaciones para trabajos futuros

Cuatro líneas de extensión natural se identifican a partir de este trabajo. La primera consiste en calibrar las distribuciones del modelo con datos reales de turno de la línea ya en operación, mediante pruebas formales de bondad de ajuste y procedimientos bootstrap para construir intervalos de confianza sobre los parámetros estimados. La segunda es introducir correlaciones entre variables aleatorias mediante cópulas o estructuras de dependencia condicionales, para capturar la covariación observada entre tipo de leche, disponibilidad de operarios y rechazos de calidad. La tercera es ampliar el modelo a una representación dinámica multi-período que incorpore aprendizaje organizacional, mantenimiento predictivo y deterioro de equipos. La cuarta es realizar un

análisis de sensibilidad global tipo Sobol sobre los parámetros del score compuesto, con el fin de cuantificar la robustez del ranking ante cambios en los pesos y en el coeficiente de aversión al riesgo. Estas extensiones convertirían al modelo en una herramienta viva de gestión, capaz de acompañar la operación de la línea durante todo su ciclo de vida.

Referencias

- Artzner, P., Delbaen, F., Eber, J. M., & Heath, D. (1999). *Coherent measures of risk*. *Mathematical Finance*, 9(3), 203–228. <https://doi.org/10.1111/1467-9965.00068>
- Boyle, P., Broadie, M., & Glasserman, P. (1997). *Monte Carlo methods for security pricing*. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 21(8–9), 1267–1321. [https://doi.org/10.1016/S0165-1889\(97\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0165-1889(97)00028-6)
- Folkard, S., & Tucker, P. (2003). *Shift work, safety and productivity*. *Occupational Medicine*, 53(2), 95–101. <https://doi.org/10.1093/occmed/kgg047>
- Goldratt, E. M. (1990). *Theory of Constraints*. North River Press.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2008). *Factory physics (3.^a ed.)*. Waveland Press.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2021). *The lenses of lean: Visioning the science and practice of efficiency*. *Journal of Operations Management*, 67(5), 610–626. <https://doi.org/10.1002/joom.1115>
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 22400-2: Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 2: Definitions and descriptions*. ISO.
- Law, A. M. (2015). *Simulation modeling and analysis (5.^a ed.)*. McGraw-Hill.
- L'Ecuyer, P. (2012). *Random number generation*. En J. E. Gentle, W. K. Härdle, & Y. Mori (Eds.), *Handbook of computational statistics* (pp. 35–71). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21551-3_3

- Levy, H. (1992). *Stochastic dominance and expected utility: Survey and analysis*. *Management Science*, 38(4), 555–593. <https://doi.org/10.1287/mnsc.38.4.555>
- Little, J. D. C. (1961). *A proof for the queuing formula: $L = \lambda W$* . *Operations Research*, 9(3), 383–387. <https://doi.org/10.1287/opre.9.3.383>
- Markowitz, H. (1952). *Portfolio selection*. *The Journal of Finance*, 7(1), 77–91. <https://doi.org/10.2307/2975974>
- Rockafellar, R. T., & Uryasev, S. (2000). *Optimization of conditional value-at-risk*. *Journal of Risk*, 2(3), 21–41. <https://doi.org/10.21314/JOR.2000.038>
- Rockafellar, R. T., & Uryasev, S. (2002). *Conditional value-at-risk for general loss distributions*. *Journal of Banking & Finance*, 26(7), 1443–1471. [https://doi.org/10.1016/S0378-4266\(02\)00271-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4266(02)00271-6)
- Ross, S. M. (2013). *Simulation* (5.^a ed.). Academic Press.
- Schmenner, R. W., & Swink, M. L. (1998). *On theory in operations management*. *Journal of Operations Management*, 17(1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(98\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(98)00028-X)
- Shingo, S. (1985). *A revolution in manufacturing: The SMED system*. Productivity Press.
- Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. (2019). *Operations management* (9.^a ed.). Pearson.
- Spearman, M. L., Woodruff, D. L., & Hopp, W. J. (1990). *CONWIP: A pull alternative to kanban*. *International Journal of Production Research*, 28(5), 879–894. <https://doi.org/10.1080/00207549008942761>

Stadtler, H., & Kilger, C. (Eds.). (2015). Supply chain management and advanced planning: Concepts, models, software, and case studies (5.^a ed.). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-55309-7>