UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

TEMA:

"ESTUDIO DE TEORÍA DE COLAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE TIEMPOS DE ESPERA EN LA EMPRESA TEXTIL TEMPOCODECA CÍA. LTDA."

AUTOR: Jefferson Javier Santander Cabezas

DIRECTOR: Ing. Valencia Chapi Robert Mauricio, PhD

Ibarra-Ecuador

2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Santander Cabezas Jefferson Javier

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Estudio de teoría de colas para la optimización de tiempos de espera en la empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda."
AUTOR (ES):	Santander Cabezas Jefferson Javier
FECHA: DD/MM/AAAA	01/09/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Industrial
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Valencia Chapi Robert Mauricio, PhD Ing. Erazo Arteaga Victor Alfonso, MSc

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 01 días del mes de septiembre de 2026.

EL AUTOR:



(Firma)……

Nombre: Santander Cabezas Jefferson Javier

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 01 de septiembre de 2026

Ing. Valencia Chapi Robert Mauricio, PhD
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:
Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Firmado electrónicamente por VALENCIA CHAPI ROBERT MAURICIO - ***9849**.

(f) .

Ing. Valencia Chapi Robert Mauricio, PhD
C.C.: 1003134879

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular "Estudio de teoría de colas para la optimización de tiempos de espera en la empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda." elaborado por Santander Cabezas Jefferson Javier, previo a la obtención del título del INGENIERO INDUSTRIAL, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Firmado electrónicamente por VALENCIA CHAPI ROBERT MAURICIO - ***9849**.

(f):…….

Ing. Valencia Chapi Robert Mauricio, PhD

C.C.: 1003134879

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
VICTOR ALFONSO ERAZO ARTEAGA

(f):…….

Ing. Erazo Arteaga Victor Alfonso, MSc

C.C.: 1719188029

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a las personas que, con su presencia y su ejemplo, hicieron posible este logro.

A mi hermana, por haber sido mi mayor apoyo y mi motivación constante a lo largo de este proceso. Su presencia incondicional constituyó el pilar fundamental que sostuvo este trabajo de principio a fin, y su confianza fue la fuerza que me impulsó a continuar incluso en los momentos de mayor incertidumbre.

A mi madre, por su entrega diaria y por el ejemplo constante que ha representado en mi formación. Los valores con los que forjó mi camino, entre ellos la honestidad, la disciplina y la perseverancia, constituyen hoy los cimientos sobre los cuales se sostiene este logro.

A mis hermanos, por su respaldo incondicional y por su acompañamiento en cada etapa de este proceso. Compartir con ellos la satisfacción de alcanzar esta meta otorga un significado aún más profundo al esfuerzo invertido.

A mis abuelos, quienes con su ejemplo de vida me enseñaron el verdadero valor del trabajo honrado, la dignidad del esfuerzo y la perseverancia ante la adversidad. Sus enseñanzas trascienden el tiempo y forman parte esencial de mi formación personal y profesional.

Jefferson Javier Santander Cabezas

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Técnica del Norte y a los docentes de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, cuya formación a lo largo de la carrera hizo posible este trabajo. A mi tutor, por su guía paciente y sus observaciones rigurosas, que marcaron el rumbo de esta investigación en cada etapa; y a mi asesor, por su tiempo y sus aportes durante la revisión del trabajo. Un agradecimiento especial a Tempocodeca Cía. Ltda., por abrirme las puertas de su planta, facilitar la toma de datos y confiar en que los resultados de este estudio aportarían a su mejora continua; sin esa disposición, este trabajo no habría sido posible. A mi familia, por su apoyo incondicional en cada etapa de este proceso. Y, por último, a mis compañeros y amigos, por su acompañamiento constante.

RESUMEN

Este trabajo aplica la teoría de colas y la simulación de eventos discretos para optimizar los tiempos de espera de la línea de producción de pantalones de la empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda., cuyo flujo presenta congestión recurrente e inventario en proceso acumulado entre jornadas. Se recolectaron 60 observaciones de tiempo por cada una de las 20 tareas del proceso y los tiempos entre llegadas por área, se ajustaron distribuciones de probabilidad con ExpertFit de FlexSim y se aplicaron las medidas de desempeño de la teoría de colas, complementadas con un modelo de simulación en FlexSim validado mediante verificación lógica y la coincidencia entre el throughput simulado (193,4 und/turno) y la capacidad analítica del cuello de botella (194 und/turno). El diagnóstico permitió identificar tres estaciones que operan como cuellos de botella dentro del proceso: coser bolsillo, revisión y limpieza, y corte de hilos, todas con un nivel de utilización igual o mayor a uno. En conjunto, la línea alcanza una capacidad efectiva de 194 unidades por turno, mientras que la demanda real asciende a 260 unidades, lo que representa un déficit del 25,3 %. Como consecuencia directa de estos cuellos de botella, cada prenda permanece en cola un promedio de 75,5 minutos antes de continuar su proceso. Cabe destacar que la variabilidad observada en los tiempos de proceso fue baja ($CV \leq 0{,}28$), lo cual descarta la inestabilidad del proceso como causa del problema y confirma que la raíz del déficit se encuentra en la capacidad instalada y en el balanceo inadecuado de la línea. De tres escenarios evaluados por simulación, el rebalanceo con polifuncionalidad, sin contratación de personal, redujo la espera en 98,2 % y elevó el throughput a 258 unidades por turno, confirmando la hipótesis y dando origen a la propuesta de mejora formulada en la sección 4.7.

Palabras clave: teoría de colas; simulación de eventos discretos; FlexSim; cuello de botella; balanceo de línea; industria textil.

ABSTRACT

This work applies queueing theory and discrete-event simulation to optimize waiting times in the trouser production line of the textile company Tempocodeca Cía. Ltda., whose flow shows recurrent congestion and work-in-process inventory carried over between shifts. Sixty-time observations were collected for each of the 20 process tasks, together with interarrival times per area; probability distributions were fitted using FlexSim's ExpertFit utility, and queueing performance measures were applied and complemented with a FlexSim simulation model validated through logical verification and the agreement between the simulated throughput (193.4 units/shift) and the analytical bottleneck capacity obtained from queueing theory (194 units/shift). The diagnosis identified three critical stations with utilization at or above one (pocket sewing, garment inspection and cleaning, and thread trimming), an effective capacity of 194 units per shift against a demand of 260 (a 25.3 % deficit), and an average queue waiting time of 75.5 minutes per garment concentrated at the bottlenecks; process variability proved low (CV $\leq$ 0.28), which rules out process instability and points instead to capacity and line balancing as the root cause. To address this, three improvement scenarios were tested through simulation. Among them, rebalancing the line through cross-trained operators — without hiring additional staff — proved the most effective: waiting time dropped by 98.2 %, and throughput rose to 258 units per shift. These results support the research hypothesis and form the basis for the improvement proposal presented in the final chapter.

Keywords: queueing theory; discrete-event simulation; FlexSim; bottleneck; line balancing; textile industry.

LISTA DE SIGLAS

ACT. Actividad del proceso productivo

CV. Coeficiente de variación

DES. Simulación de Eventos Discretos (Discrete-Event Simulation)

FIFO. Primero en entrar, primero en salir (First In, First Out)

IESS. Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social

IM%. Índice de mejora relativa del tiempo de espera

ISO. Organización Internacional de Normalización

KPI. Indicador clave de desempeño (Key Performance Indicator)

K-S. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

MiPyme. Micro, pequeña y mediana empresa

NIOSH. Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (EE. UU.)

ODS. Objetivos de Desarrollo Sostenible

TOC. Teoría de Restricciones (Theory of Constraints)

UTN. Universidad Técnica del Norte

WIP. Trabajo en proceso (Work in Process)

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I **17**
1.1. Problema de investigación 17
1.2. Justificación 19
1.3. Objetivos 21
1.3.1. Objetivo General 21
1.3.2. Objetivos Específicos 21
1.3.3. Hipótesis o preguntas de investigación 21
CAPÍTULO II **23**
2.1. Antecedentes 23
2.2. Teoría de colas 25
2.2.1. Conceptos fundamentales 25
2.2.2. Elementos de un sistema de colas 26
2.2.3. Notación de Kendall 27
2.2.4. Modelos de colas más comunes (M/M/1, M/M/c, M/G/1) 27
2.2.5. Medidas de desempeño y ecuaciones fundamentales 28
2.3. Simulación de eventos discretos 31
2.3.1. Fundamentos de simulación discreta 31
2.3.2. Componentes de un modelo de simulación 31
2.3.3. Proceso de modelado y simulación 31
2.3.4. Verificación y validación de modelos de simulación 32
2.4. Software FlexSim 33
2.4.1. Características y capacidades 33
2.4.2. Objetos y librerías en FlexSim 33
2.4.3. Proceso de modelado en FlexSim 33
2.4.4. Análisis de resultados en FlexSim 33
2.5. Análisis estadístico para simulación 34
2.6. Teoría de restricciones 37
2.6.1. Conceptos fundamentales 37
2.6.2. Identificación de cuellos de botella 37
2.6.3. Métodos de optimización de restricciones 38

2.7. Procesos textiles 38
2.7.1. Características de la producción textil 38
2.7.2. Indicadores de desempeño industrial 38
2.8. Marco legal 38
2.8.1. Normativa Internacional y Estandarización 39
2.8.2. Legislación sobre Seguridad y Salud Ocupacional 39
2.8.3. Legislación Laboral y Contratación 40
CAPÍTULO III **41**
3.1. Tipo y enfoque de investigación 41
3.2. Diseño metodológico 41
3.3. Materiales y sujeto de estudio 43
3.4. Descripción del proceso productivo 44
3.5. Estructura del modelo en FlexSim 45
3.6. Recolección de datos — todas las áreas productivas 46
3.6.1. Variables medidas y método 46
3.6.2. Área de Corte — ACT 1 a ACT 5 46
3.6.3. Área de Confección — ACT 6 47
3.6.4. Área de Calidad e Hilos — ACT 7 y ACT 8 48
3.6.5. Área de Empaque — ACT 9 a ACT 11 49
3.6.6. Tiempos entre llegadas de lotes (λ) — todas las áreas 50
3.7. Ajuste estadístico con ExpertFit de FlexSim 51
3.8. Aplicación de la teoría de colas: diagnóstico analítico del estado actual 53
3.8.1. Parámetros globales del sistema 54
3.8.2. Utilización y capacidad por estación 54
3.8.3. Identificación analítica de los cuellos de botella 56
3.8.4. Análisis transitorio de las estaciones saturadas 57
3.8.5. Esperas en las estaciones estables 58
3.8.6. Contraste con el modelo agregado de varios servidores 58
3.9. Construcción del modelo en FlexSim y dashboards 59
3.10. Verificación y validación 59
3.10.1. Verificación lógica 59
3.10.2. Validación estadística — prueba t pareada 60

3.11. Lectura de resultados de FlexSim y clasificación del modelo de colas 60
3.11.1. Dashboards de FlexSim 60
3.11.2. Clasificación del tipo de cola definitiva 61
3.12. Diseño y evaluación analítica de los escenarios de mejora 62
CAPÍTULO IV **65**
4.1. Verificación y validación del modelo del estado actual 65
4.2. Resultados de la simulación del estado actual 67
4.3. Clasificación definitiva del modelo de colas 68
4.4. Comparación de los escenarios de mejora simulados 69
4.5. Verificación de la hipótesis de investigación 70
4.6. Discusión de resultados 71
4.7. Propuesta de mejora 72
4.7.1. Fundamento de la propuesta 72
4.7.2. Objetivo y alcance 72
4.7.3. Descripción de la propuesta de rebalanceo 73
4.7.4. Plan de implementación 74
4.7.5. Análisis costo-beneficio 74
4.7.6. Indicadores de seguimiento 75
4.7.7. Riesgos y consideraciones 75
4.8. Conclusiones 76
4.9. Recomendaciones 78
4.10. Referencias Bibliográficas 79
4.11. Anexos 84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Caracterización de áreas operativas — Tempocodeca Cía. Ltda. 43
Tabla II. Descripción del proceso de producción de pantalones. 44
Tabla III. Estructura de objetos FlexSim / proceso completo 45
Tabla IVa. Tiempos de servicio, Área de Corte (n = 60) 46
Tabla IVb. Tiempos de servicio, Área de Confección ACT 6 (n = 60) 47
Tabla IVc. Tiempos de servicio — Área de Calidad (n = 60) 48
Tabla IVd. Tiempos de servicio — Área de Empaque (n = 60) 49
Tabla IVe. Tiempos entre llegadas de lotes de todas las áreas (n = 30) 50
Tabla V. Resultados del ajuste estadístico por tarea 51
Tabla VI. Diagnóstico analítico por estación: estado actual (λ = 32,5 und/h) 55
Tabla VII. Clasificación del modelo de colas por área a partir de las distribuciones ajustadas 61
Tabla VIII. Evaluación analítica comparativa de los escenarios de mejora 63
Tabla IX. Validación estadística del modelo del estado actual (prueba t pareada, Ec. 12) 65
Tabla X. Contraste entre el diagnóstico analítico y la simulación del estado actual 68
Tabla XI. Clasificación definitiva del modelo de colas confirmada con la simulación 68
Tabla XII. Comparación de escenarios: resultados de simulación (promedio de 10 réplicas) 69
Tabla XIII. Reasignación de operarios propuesta (Escenario B) 73
Tabla XIV. Fases del plan de implementación 74
Tabla XV. Indicadores clave de seguimiento (KPI) de la propuesta 75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura general de un sistema de colas. 27
Figura 2. Etapas metodológicas del estudio (E1–E8). 43
Figura 3. Histograma y distribución ajustada de la tarea Coser bolsillo (ACT 6.4). 53
Figura 4. Representación del proceso de producción de pantalones como red de colas en tándem. 54
Figura 5. Factor de utilización por estación frente al límite de estabilidad ρ = 1. 56
Figura 6. Throughput simulado frente al valor de referencia de capacidad analítica del sistema. 66
Figura 7. Crecimiento proyectado de las colas críticas durante la jornada según el modelo fluido (Ec. 9). 67
Figura 8. Throughput y espera total en estaciones críticas por escenario. 70
Figura 9. Los cinco pasos de focalización de la TOC aplicados a la línea de pantalones. 72
Figura 10. Cronograma de implementación de la propuesta. 74

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Vista general de la línea de producción de pantalones de Tempocodeca Cía. Ltda. 50
Ilustración 2. Estaciones críticas de la línea. 55
Ilustración 3. Vista tridimensional isométrica del modelo de simulación construido en FlexSim, con las cuatro áreas (Corte, Confección, Calidad y Empaque), los objetos fijos y los operarios asignados.....59
Ilustración C1. (Jornada 1, calentamiento) Dashboard Output, throughput acumulado por cola. 85
Ilustración C2. (Jornada 1, calentamiento) Dashboard Staytime — tiempo medio de espera en cola por búfer. 86
Ilustración C3. (Jornada 1, calentamiento) Dashboard Staytime 1 — tiempo de permanencia por estación. 86
Ilustración C4. (Jornada 1, calentamiento) Dashboard State — utilización por estación. 87
Ilustración C5. (Jornada 1, calentamiento) Dashboard Content — contenido (prendas en cola) por búfer. 88
Ilustración C6. (Jornada 2, régimen) Dashboard Output — throughput acumulado por cola.. 88
Ilustración C7. (Jornada 2, régimen) Dashboard Staytime, tiempo medio de espera en cola. 89
Ilustración C8. (Jornada 2, régimen) Dashboard Staytime 1, tiempo de permanencia por estación. 89
Ilustración C9. (Jornada 2, régimen) Dashboard State, utilización por estación. 90
Ilustración C10. (Jornada 2, régimen) Dashboard Content, contenido por búfer. 91

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de investigación

En el contexto industrial y productivo a nivel macro, la optimización de procesos es un desafío central para mejorar la competitividad y eficiencia. La gestión eficiente de los procesos productivos y de servicio se ha convertido en un factor estratégico esencial para la competitividad de cualquier organización en la economía global [1]. Ante la creciente complejidad de los sistemas y la presión por alcanzar la máxima eficiencia operativa [2], las industrias, sean grandes o pequeñas (MiPymes), deben enfocarse en la optimización del uso de sus recursos y la reducción del tiempo de ciclo de sus operaciones para garantizar su sostenibilidad a largo plazo[3]. En particular, las organizaciones manufactureras intensivas en mano de obra, como el sector textil, se ven especialmente afectadas por la formación de colas y la existencia de tiempos de espera entre operaciones, que se traducen directamente en retrasos de entrega y aumento de costos operativos. Las decisiones estratégicas, tácticas y operativas requieren el apoyo de modelos matemáticos y de simulación respaldados por la Investigación de Operaciones (IO) [2], [4], ya que la toma de decisiones debe sustentarse en criterios científicos ante la dinámica de cambio frecuente y profundo de la sociedad. Dentro de este marco, un área crítica que afecta directamente el desempeño y la satisfacción del cliente es la ineficiente gestión de los tiempos, manifestada en los periodos de espera que sufren los productos o servicios[2].

En un sistema productivo o de servicios, en este caso textil, resulta fundamental comprender que su estabilidad depende de que la tasa de llegada de los lotes de trabajo no exceda la capacidad de servicio de las estaciones encargadas de procesarlos. Cuando este equilibrio se rompe y los ingresos de productos a la línea superan la velocidad con la que pueden ser atendidos, el sistema entra en un estado de saturación. Bajo esta condición, los tiempos de espera aumentan exponencialmente, se pierde el control sobre la fluidez del proceso y comienza a formarse una acumulación de unidades en cola. Este comportamiento no es un simple retraso operacional, sino una señal estructural de que el proceso está

operando por encima de su límite funcional, lo que explica la presencia de cuellos de botella, tiempos muertos y la disminución del rendimiento global que actualmente se observa en la empresa[5].

En este contexto macro, y en consonancia con la realidad productiva nacional, la empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda. refleja una problemática que se alinea con estas deficiencias operacionales micro-escalares. Actualmente, en sus áreas críticas, la situación se evidencia en largos periodos de tiempo que los procesos esperan para poder ser manufacturados o atendidos [2]. Esta situación se observa de forma particular en la línea de producción de pantalones, una de las más representativas por su volumen y relevancia, donde se forman colas frente a ciertas estaciones de trabajo, evidenciando una distribución desigual de la carga y la presencia de cuellos de botella. Esta demora es un síntoma de que el sistema productivo opera por debajo de su potencial, lo que indica que el proceso tiene muchas áreas de oportunidad [2]. A menudo, en negocios pequeños y medianos, esta ineficiencia es producto de un modelo de negocio empírico[3], o de la ausencia de un modelo formal con fundamentos técnicos para la gestión de sus operaciones [2]. Tempocodeca Cía. Ltda. no es ajena a esta realidad, ya que la planificación y asignación de recursos en la línea de pantalones se basa principalmente en la experiencia del personal, sin el apoyo de herramientas cuantitativas que permitan dimensionar adecuadamente la capacidad de cada estación frente a la variabilidad de la demanda y de los tiempos de proceso. La consecuencia directa de estos tiempos de espera es la formación de colas y la aparición de cuellos de botella (recursos restrictivos) que limitan el flujo productivo general de la empresa[3]. Estas restricciones pueden ser de naturaleza física (capacidad de producción o maquinaria) o, de forma más frecuente, políticas (procedimientos o lineamientos establecidos de manera errónea)[3].

Los problemas generados son múltiples: se registra una baja productividad y una disminución de la rentabilidad, hay un manejo ineficiente de los recursos, lo cual puede repercutir en la cancelación de pedidos [2],[3]. En el caso específico de Tempocodeca Cía. Ltda., los retrasos asociados a la línea de pantalones impactan directamente en el cumplimiento de las fechas comprometidas con los

clientes y en la estabilidad de las relaciones comerciales, en un entorno textil cada vez más competitivo a nivel local y nacional. Para abordar esta problemática de la empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda. en estudio y transformar la ineficiencia en un sistema optimizado, se recurrirá a las herramientas de Ingeniería Industrial. En primera instancia, se requiere una revisión del estado de la técnica que incluya modelos de teoría de colas y herramientas de simulación, puesto que la teoría de colas es fundamental para modelar sistemas probabilísticos variables en el tiempo y analizar el desempeño operativo de los procesos [5], [4]. La combinación de estos modelos con un software de simulación discreta permite representar de forma cercana la dinámica real de la línea de pantalones, evaluando el impacto de los tiempos de espera y de las decisiones sobre asignación de recursos.

El enfoque de aplicar el estudio de teoría de colas y simulación con FlexSim para optimizar los tiempos de espera y mejorar la eficiencia del flujo productivo, particularmente en la línea de pantalones de empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda., se procederá a simular el estado actual de la línea de producción utilizando el software FlexSim, lo cual permitirá visualizar el comportamiento dinámico del sistema actual y la utilización de recursos sin necesidad de intervenir el proceso real. Los resultados de esta simulación servirán de base para diagnosticar el funcionamiento del sistema y formular estrategias [2], encaminadas a desarrollar una propuesta de mejoras cuantificables para el sistema de colas y los procesos de producción, evaluando alternativas que reduzcan los cuellos de botella en las estaciones críticas. La intención es lograr una solución óptima y rápida mediante la IO, en lugar de recurrir al costoso método de prueba y error [2].

1.2. Justificación

El estudio se justifica bajo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) al buscar la optimización de la eficiencia del flujo productivo y la reducción de tiempos de espera en la empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda., lo que se alinea con la sostenibilidad industrial y la gestión eficiente de recursos.

Específicamente, se relaciona con el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) [6] al aplicar la Teoría de Colas y la simulación con FlexSim como herramientas de optimización y control para mejorar la escalabilidad y la eficiencia de los sistemas de producción [7], [8].

Los beneficios técnicos y prácticos del estudio son inmediatos y tangibles. Proporciona un análisis preciso de las mejoras cuantificables del proceso, específicamente dirigidas a eliminar tiempos de espera y cuellos de botella. A nivel nacional, el estudio también se fundamenta legalmente en el Plan Nacional de Desarrollo, que es el instrumento máximo de planificación del Estado Ecuatoriano. Específicamente, responde al Eje Económico, cuyo objetivo es "Fomentar de manera sustentable la producción mejorando los niveles de productividad y competitividad en los sectores agrícola, industrial, acuícola y pesquero" [9].

El estudio cobra relevancia porque la teoría de colas se ha consolidado como una herramienta científica clave para comprender el comportamiento estocástico de los sistemas productivos. Diversos trabajos la han empleado para analizar sistemas en los que tanto la demanda como la capacidad de servicio presentan variabilidad, lo que permite estimar métricas esenciales —tiempos de espera, longitud promedio de cola y probabilidad de saturación de los recursos— que resultan determinantes para el diagnóstico de este tipo de procesos [10], [11]. En entornos industriales, estas métricas permiten diagnosticar con precisión los puntos donde se genera congestión operativa y orientar intervenciones basadas en evidencia.

La justificación del caso de estudio se fundamenta en que la línea de producción evaluada evidencia comportamientos típicos de sistemas con alta variabilidad, donde los tiempos de llegada y de servicio fluctúan y provocan acumulación de trabajo en proceso. Este tipo de comportamiento, donde incrementos moderados en la tasa de llegada pueden generar aumentos desproporcionados en los tiempos de espera y en la extensión de las colas, afecta directamente la eficiencia operativa del sistema [12], [13]. En procesos textiles,

cuya estructura depende de una secuencia estricta de operaciones, la saturación de una sola estación tiene el potencial de restringir el flujo global y originar cuellos de botella que disminuyen el rendimiento total del proceso [14]. Frente a este escenario, el uso combinado de teoría de colas y simulación de eventos discretos constituye una herramienta pertinente para identificar con precisión los puntos críticos, analizar el comportamiento dinámico del sistema y evaluar alternativas de mejora sin interrumpir la operación real [15]. Por estas razones, el estudio resulta necesario para comprender y optimizar el desempeño del sistema productivo evaluado.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Optimizar los tiempos de espera mediante el estudio de teoría de colas y simulación de sistemas con FlexSim para mejorar la eficiencia del flujo productivo en la empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Revisar la teoría de colas y las herramientas de simulación mediante una revisión del estado de la técnica, con el fin de sustentar el análisis y modelado de la línea de producción.
2. Construir, verificar y validar el modelo de simulación del estado actual de la línea de producción en FlexSim, para identificar los tiempos de espera, tipo de distribución estadística, cuellos de botella y el rendimiento real del sistema productivo.
3. Evaluar y comparar alternativas de mejora mediante simulación, con el fin de seleccionar la opción más eficiente para optimizar los tiempos de espera y el flujo productivo.

1.3.3. Hipótesis o preguntas de investigación

¿En qué medida la aplicación de la teoría de colas y la simulación de eventos discretos con FlexSim permite identificar los cuellos de botella y reducir

los tiempos de espera en la línea de producción de pantalones de la empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda.?

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

La aplicación de la simulación de eventos discretos y la teoría de colas para la optimización de sistemas productivos cuenta con un sólido respaldo en la literatura reciente. A nivel internacional, varios estudios han validado la combinación de ambos enfoques como metodología efectiva para reducir tiempos de espera e identificar restricciones en líneas de producción y sistemas de servicio. Entre los antecedentes más relevantes se encuentra el trabajo de Aguilar Montoya et al. (2025), quienes emplearon FlexSim para optimizar una línea de producción manufacturera mediante simulación comparativa frente a métodos tradicionales [7]. Los resultados de dicha investigación evidenciaron que el modelado en FlexSim posibilita identificar configuraciones óptimas de recursos sin recurrir a la experimentación física, lo que respalda el uso de esta herramienta para el diagnóstico y la mejora de sistemas productivos —principio que resulta directamente aplicable al análisis de la línea de pantalones de Tempocodeca Cía. Ltda.

En esta misma línea, Legato y Mazza exploraron la integración de modelos analíticos y de simulación aplicada a procesos logísticos portuarios [16]. Combinando la teoría de colas con la simulación de eventos discretos, los autores profundizaron en el análisis de los tiempos de espera durante las operaciones de carga y descarga. Esta metodología les permitió cuantificar el impacto de distintas estrategias operativas, dando lugar a un enfoque híbrido que articula la capacidad analítica de la teoría de colas para el diagnóstico inicial con el potencial de la simulación para la evaluación detallada de escenarios.

Este enfoque resulta pertinente para Tempocodeca Cía. Ltda., ya que también enfrenta problemas de acumulación de trabajo en proceso y tiempos de espera, por lo que la combinación de teoría de colas y simulación constituye una base metodológica adecuada para el análisis de su sistema productivo.

En el ámbito específico de la identificación de restricciones, un estudio de Gunreddy et al. utilizó la simulación de eventos discretos para realizar un análisis de cuellos de botella en una unidad de manufactura [17]. Su trabajo se centró en diagnosticar las estaciones que limitaban el flujo productivo, permitiéndoles proponer reconfiguraciones del proceso que optimizaron sustancialmente la utilización de los recursos. Asimismo, Gontara et al. (2021) abordaron el problema central de los tiempos de espera, aplicando un modelo de colas para optimizar el sistema de una administración aduanera [18]. Su investigación desarrolló estrategias basadas en un análisis cuantitativo para reducir las demoras, enfatizando la utilidad de los modelos de colas para generar soluciones efectivas y cuantificables. En conjunto, estos antecedentes demuestran la viabilidad y eficacia de la metodología propuesta, la cual se sustenta en el diagnóstico de cuellos de botella [17], y la optimización de tiempos de espera [1], mediante herramientas respaldadas por la investigación operativa contemporánea.

En la provincia de Imbabura, varios estudios han identificado que las empresas textiles locales enfrentan limitaciones estructurales relacionadas con la falta de balanceo de cargas, la variabilidad de los tiempos de operación y la acumulación de trabajo en proceso. Yépez y Doukh (2021) analizaron una pequeña empresa textil de la zona y demostraron que la ausencia de distribución equilibrada de tareas entre estaciones generaba tiempos de espera prolongados, incrementos en el WIP y reducción de la productividad global del sistema, evidenciando problemas similares a los observados en Tempocodeca Cía. Ltda. [19].

Asimismo, Yépez, Flores et al. (2024) estudiaron otra compañía textil de Imbabura y encontraron que la falta de métodos cuantitativos para gestionar la producción provocaba congestión operativa en etapas específicas, ocasionando que los tiempos de respuesta dependieran más de la experiencia del operario que de la capacidad instalada. Este comportamiento coincide con el patrón de saturación que se presenta en las áreas críticas de Tempocodeca Cía. Ltda., donde la dinámica del flujo se altera por variaciones en los tiempos de servicio y tiempos de llegada de los lotes[20].

De manera similar, Orozco Crespo et al. desarrollaron un estudio de planificación agregada para otra empresa textil de la región, evidenciando que las capacidades operativas reales no se alineaban con los requerimientos de producción debido a la variabilidad de proceso, generando retrasos crecientes a medida que la carga de trabajo aumenta [21].

La optimización de los sistemas productivos en la empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda. se aborda combinando dos herramientas que se complementan: el análisis matemático de la teoría de colas y la simulación de eventos discretos (DES). La razón es práctica antes que teórica: probar cambios directamente en la planta cuesta dinero y arriesga la producción, mientras que un modelo permite ensayar esos cambios sin tocar el sistema real [22].

Este capítulo reúne la base teórica que el resto del trabajo necesita: los modelos matemáticos con los que se diagnostica el sistema productivo y las técnicas de simulación con las que se verifica ese diagnóstico. Los temas se organizan de lo general a lo particular, partiendo de los modelos analíticos y avanzando hacia las técnicas de simulación.[23].

2.2. Teoría de colas

La teoría de colas es una rama de la investigación operativa que analiza matemáticamente el comportamiento de las líneas de espera. En el ámbito de los sistemas de producción, las "colas" representan el inventario en proceso (WIP) acumulado frente a una estación de trabajo, y los "servidores" son las máquinas o los operarios que procesan dicho material[24],[10]. Su objetivo fundamental en manufactura no es simplemente eliminar las esperas, sino encontrar un equilibrio económico óptimo entre el costo de incrementar la capacidad operativa (más máquinas o velocidad) y el costo asociado a tener material detenido o pedidos retrasados[25].

2.2.1. Conceptos fundamentales

El origen de esta disciplina se remonta a los trabajos de Agner Krarup Erlang en 1909. Aunque inicialmente se aplicó a la telefonía, sus principios rigen

cualquier sistema donde la demanda de servicio supera temporalmente la capacidad de procesamiento debido a la naturaleza estocástica de los flujos[24], [60],[26]. En una planta productiva, las colas se forman no solo por falta de capacidad media, sino por la variabilidad: los tiempos de llegada de las órdenes de producción y los tiempos de proceso de las máquinas (averías, configuraciones) fluctúan aleatoriamente[26].

2.2.2. Elementos de un sistema de colas

Para caracterizar adecuadamente un sistema de colas, se deben identificar componentes clave:

1. Fuente de entrada: Puede ser finita o infinita. En modelos industriales, si el número de máquinas que pueden fallar es pequeño, se considera población finita; si llegan pedidos externos, suele considerarse infinita[26].
2. Patrón de llegadas: Define la distribución probabilística con la que los clientes o ítems entran al sistema. Habitualmente se asume que estas llegadas son aleatorias e independientes, siguiendo una distribución de Poisson [25], [27].
3. Mecanismo de servicio: Describe el tiempo que tarda el recurso (máquina/operario) en procesar una unidad. A diferencia de los servicios humanos, en manufactura estos tiempos pueden ser deterministas (automatización) o seguir distribuciones generales debido a variaciones en la calidad del material o fatiga.
4. Disciplina de la cola: Es la regla de prioridad para seleccionar el siguiente trabajo a procesar. La más común en producción es FIFO (First In, First Out), aunque existen otras como LIFO (Last In, First Out), esto es esencial para evitar la obsolescencia del inventario, aunque existen reglas de prioridad (PRI) basadas en fechas de entrega o tiempos de proceso más cortos[27], [28].
5. Capacidad del sistema: El límite físico de almacenamiento (búferes) entre estaciones. Si se llena, se produce un bloqueo en la estación anterior, fenómeno crítico en líneas de ensamble[27], [28].

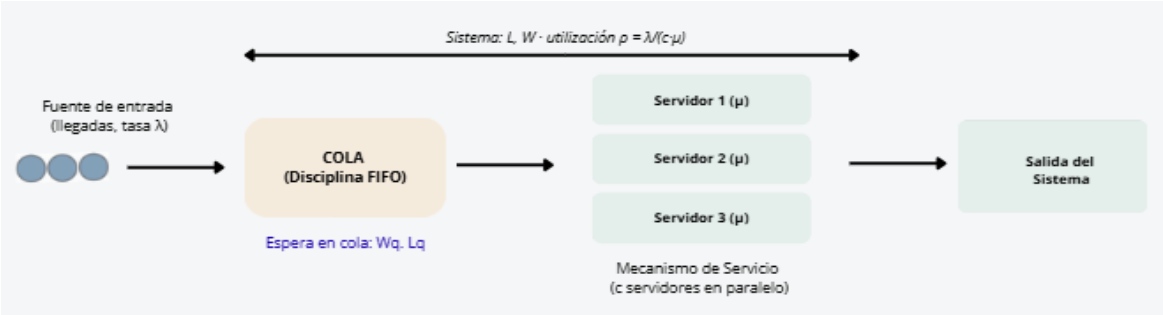


Figura 1. Estructura general de un sistema de colas.

Fuente: elaboración propia.

2.2.3. Notación de Kendall

Para estandarizar la clasificación de estos sistemas, David Kendall propuso en 1953 una notación del tipo A/B/c/K/N/D, donde A representa la distribución de tiempos entre llegadas, B la distribución del tiempo de servicio, c el número de servidores paralelos, K la capacidad del sistema, N el tamaño de la población y D la disciplina de la cola[29],[26]. Esta nomenclatura permite identificar rápidamente la complejidad matemática del modelo a utilizar [25],[27].

La clasificación de un sistema bajo esta notación depende de la naturaleza estadística de sus llegadas y de sus tiempos de servicio; por ello se obtiene a partir del ajuste de las distribuciones empíricas de cada proceso y no puede establecerse a priori.

2.2.4. Modelos de colas más comunes (M/M/1, M/M/c, M/G/1)

La selección del modelo adecuado depende de la naturaleza de los datos operativos [28], [56], [29]:

- M/M/1: Modelo elemental con llegadas de Poisson (M), tiempos de servicio exponenciales (M) y un solo servidor. Es útil para aproximaciones iniciales, asumiendo una alta variabilidad en el proceso[28].
- M/M/c: Extensión para múltiples servidores (c) en paralelo alimentados por una sola cola. En producción, demuestra que consolidar recursos en un banco

de máquinas es más eficiente que tener filas separadas para cada máquina [26].

- M/G/1: Este modelo es crucial en entornos de manufactura donde los tiempos de máquina no son necesariamente exponenciales, sino que siguen una distribución General (G) con una varianza específica (frecuentemente menor que la exponencial). Se rige por la fórmula de Pollaczek-Khintchine, la cual demuestra que reducir la variabilidad del proceso (desviación estándar) disminuye directamente el tiempo de espera en la línea[28],[25],[26].

2.2.5. Medidas de desempeño y ecuaciones fundamentales

La evaluación cuantitativa de un sistema de colas en estado estable se realiza mediante un conjunto de medidas de desempeño: el número medio de entidades en el sistema (L), la longitud media de la cola (L_q), el tiempo medio de permanencia en el sistema (W), el tiempo medio de espera en cola (W_q) y el factor de utilización (ρ) [26], [32]. Estas medidas constituyen la base del diagnóstico de congestión de la línea de producción y de la comparación de alternativas de mejora. Estas medidas se definen mediante las expresiones que se presentan a continuación.

Factor **de utilización.** Para un sistema con tasa media de llegadas λ, tasa media de servicio μ por servidor y c servidores en paralelo, el factor de utilización se define como [26], [32]:

$$\rho = \frac{\lambda}{c \cdot \mu} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

El valor de ρ representa la fracción de tiempo que los servidores permanecen ocupados y es la condición de estabilidad del sistema: si $\rho < 1$ el sistema alcanza el estado estable; si $\rho \geq 1$ la demanda supera la capacidad, la cola crece sin límite y las medidas de estado estable dejan de estar definidas [26], [32].

Ley de Little. Establece una relación fundamental entre el inventario, la tasa de llegada y el tiempo de permanencia, válida para cualquier sistema estable

con independencia de las distribuciones de probabilidad y de la disciplina de la cola [44], [55]:

$$L = \lambda \cdot W \qquad \text{(Ec. 2)}$$

$$L_q = \lambda \cdot W_q \qquad \text{(Ec. 3)}$$

Ambas expresiones se complementan con la relación entre el tiempo en el sistema y el tiempo en cola [32], [44]:

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \qquad \text{(Ec. 4)}$$

Modelo M/M/c. Cuando las llegadas siguen un proceso de Poisson y los tiempos de servicio son exponenciales con *c* servidores en paralelo, la longitud media de la cola se obtiene a partir de la probabilidad de sistema vacío P_0 [26], [32]:

$$L_q = \left[\frac{(\lambda/\mu)^c \cdot \rho}{c! \cdot (1-\rho)^2}\right] \cdot P_0 \qquad \text{(Ec. 5)}$$

Donde, $P0 = [\,\Sigma n = 0 \ldots c-1\ (\lambda/\mu)n/n! + (\lambda/\mu)c\ /\ (\,c! \cdot (1-\rho)\,)\,] - 1$. A partir de L_q se obtienen W_q y W mediante las Ec. 3 y 4 [26], [32].

Modelo M/G/1 y fórmula de Pollaczek-Khintchine. Cuando el tiempo de servicio sigue una distribución general con media $1/\mu$ y varianza σ^2, el tiempo medio de espera en cola de un sistema de un servidor es [32]:

$$W_q = \frac{\lambda \cdot (\sigma^2 + 1/\mu^2)}{2 \cdot (1-\rho)} \qquad \text{(Ec. 6)}$$

Según la fórmula de Pollaczek-Khintchine, el tiempo de espera aumenta en proporción directa a la varianza del servicio, de modo que reducir la variabilidad del proceso disminuye la espera incluso sin necesidad de ampliar la capacidad [28], [32].

Aproximación G/G/1 y G/G/c. Para llegadas y servicios con distribuciones generales no existe una solución analítica cerrada. Kingman [12] propuso una aproximación de tráfico pesado para un servidor, conocida como ecuación VUT (variabilidad–utilización–tiempo):

$$W_q \approx \left(\frac{\rho}{1-\rho}\right) \cdot \left(\frac{C_a^2+C_s^2}{2}\right) \cdot E[S] \qquad \text{(Ec. 7)}$$

donde C_a y C_s son los coeficientes de variación de los tiempos entre llegadas y de servicio, y $E[S]$ es el tiempo medio de servicio. Su extensión a c servidores, conocida como aproximación de Allen-Cunneen, corrige la espera del modelo M/M/c equivalente con el mismo factor de variabilidad [36], [45], [61]:

$$W_{q(G/G/c)} \approx \left(\frac{C_a^2+C_s^2}{2}\right) \cdot W_{q(M/M/c)} \qquad \text{(Ec. 8)}$$

Esta formulación es la base del análisis de líneas de manufactura en la denominada física de fábrica, pues separa explícitamente los efectos de la utilización y de la variabilidad sobre la congestión [36], [59].

Comportamiento transitorio de estaciones saturadas. Las ecuaciones anteriores suponen estado estable ($\rho < 1$). Cuando $\rho \geq 1$, el análisis pertinente es transitorio: bajo una aproximación fluida (de flujo continuo), el inventario acumulado en cola crece de forma aproximadamente lineal durante un periodo de operación finito T [32], [36]:

$$N_q(T) \approx (\lambda - c \cdot \mu) \cdot T \qquad \text{(Ec. 9)}$$

Mediante la Ec. 9 es posible estimar la acumulación de trabajo en proceso por turno en una estación saturada y, a partir de ella, la espera media de las unidades que ingresan durante la jornada, expresada como $(\lambda/(c \cdot \mu) - 1) \cdot T/2$. Este enfoque resulta apropiado para sistemas de manufactura que operan por jornadas y que arrastran inventario entre turnos [36].

Modelos de decisión **en colas.** La elección del nivel de capacidad óptimo equilibra el costo de mantener servidores y el costo de la espera. El modelo de costos define el costo total esperado por unidad de tiempo [32]:

$$CT = C_s \cdot c + C_w \cdot L_q \qquad \text{(Ec. 10)}$$

donde C_s es el costo unitario de cada servidor y C_w el costo de espera por unidad y por unidad de tiempo. Para comparar alternativas de mejora frente al estado actual se emplea, además, el índice de mejora relativa del tiempo de espera:

$$IM\% = \left[\frac{W_{q,actual} - W_{q,propuesto}}{W_{q,actual}}\right] \cdot 100 \qquad \text{(Ec. 11)}$$

2.3. Simulación de eventos discretos

Cuando los sistemas reales son demasiado complejos para ser resueltos mediante fórmulas analíticas cerradas (como las de teoría de colas), la simulación de eventos discretos (DES) pasa a ser la herramienta de referencia[24], [27].

2.3.1. Fundamentos de simulación discreta

La DES modela el funcionamiento de un sistema como una secuencia cronológica de eventos. Cada evento ocurre en un instante discreto en el tiempo y marca un cambio de estado en el sistema (e.g., llegada de materia prima, fin de un proceso)[23]. A diferencia de los modelos continuos, la simulación discreta permite analizar la dinámica, la aleatoriedad y la interdependencia de los recursos a lo largo del tiempo[24], [30].

2.3.2. Componentes de un modelo de simulación

Un modelo DES se construye integrando entidades (productos que fluyen), recursos (máquinas, operarios), variables de estado y un reloj de simulación. La incertidumbre se introduce mediante generadores de números pseudoaleatorios (técnica Monte Carlo), lo que permite recrear la variabilidad real de la planta en un entorno virtual [31], [32], [58].

2.3.3. Proceso de modelado y simulación

Para garantizar la validez de los resultados, se sigue un ciclo de vida riguroso: 1) Formulación del problema, 2) Recolección y análisis de datos de entrada (verificación de aleatoriedad y homogeneidad), 3) Construcción del modelo computacional, 4) Verificación y Validación (asegurar que el modelo

digital replica la realidad con precisión estadística), 5) Experimentación de escenarios y 6) Análisis de resultados para la toma de decisiones[23], [27], [32].

2.3.4. Verificación y validación de modelos de simulación

La credibilidad de un modelo de simulación se sustenta en dos procesos complementarios definidos por Sargent [15]: la **verificación**, que comprueba que el modelo computacional implementa correctamente el modelo conceptual (lógica de flujo, parámetros, rutas), y la **validación**, que determina si el modelo representa al sistema real con la precisión requerida para el propósito del estudio.

Entre las técnicas de verificación se incluyen la revisión de la animación 3D, el seguimiento de trazas de entidades individuales, la prueba de casos extremos y la comprobación del balance de flujo entre estaciones [25], [31]. La validación estadística se realiza comparando una medida de desempeño simulada con su valor histórico real mediante la prueba t de Student pareada sobre *n* réplicas independientes [15], [25]:

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}} \qquad \text{(Ec. 12)}$$

donde $\bar{d}$ es la media de las diferencias entre el valor simulado y el valor real, S_d su desviación estándar y $n - 1$ los grados de libertad. Si el p-valor resulta mayor que el nivel de significancia α (usualmente 0,05), no se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y el modelo se declara estadísticamente válido [15].

Dado que cada corrida de simulación es una muestra de un proceso estocástico, los resultados se reportan a partir de *n* réplicas independientes con semillas distintas, construyendo intervalos de confianza para la media de la forma $\bar{x} \pm t\alpha/2; n-1 \cdot S/\sqrt{n}$, [25], [31], [50]. Adicionalmente, cuando el sistema real no inicia vacío, se emplea un periodo de calentamiento (warm-up) cuyas observaciones se descartan para eliminar el sesgo de las condiciones iniciales [25], [51], [52].

2.4. Software FlexSim

Para la ejecución de la simulación, esta investigación utiliza FlexSim, un entorno orientado a objetos y gráficos 3D[23], [33]; en los rankings de uso de paquetes comerciales de simulación de eventos discretos, FlexSim figura de forma sostenida entre las primeras posiciones a nivel mundial [53].

2.4.1. Características y capacidades

FlexSim destaca por su capacidad de visualización en 3D y su entorno de "arrastrar y soltar", lo que facilita la validación visual del modelo. Permite modelar flujos discretos y continuos, integrando lógica personalizada para gestionar la variabilidad de procesos industriales complejos[23]. Es reconocido por su capacidad para identificar cuellos de botella y optimizar el uso de recursos en entornos de manufactura[23].

2.4.2. Objetos y librerías en FlexSim

El software utiliza objetos predefinidos paramétricos (como Source, Queue, Processor, Sink) disponibles en librerías estándar. Estos objetos discretos crean, envían y almacenan elementos, ejecutando operaciones tecnológicas y logísticas que imitan el comportamiento de la planta real[23], [33].

2.4.3. Proceso de modelado en FlexSim

El modelado implica trasladar el layout y el diagrama de flujo del proceso real al entorno 3D, conectando los objetos para definir la ruta del material. FlexSim gestiona la base de datos del modelo, permitiendo al investigador introducir parámetros estadísticos y reglas lógicas (como horarios de turnos y mantenimientos) directamente en cada objeto[23].

2.4.4. Análisis de resultados en FlexSim

A través de dashboards y herramientas estadísticas, el software permite ejecutar múltiples réplicas para obtener intervalos de confianza sobre métricas

como el throughput (tasa de salida), la utilización de recursos y los tiempos de permanencia. Además, incluye módulos como OptQuest para realizar experimentos de optimización y análisis de sensibilidad sobre variables críticas como la cantidad de operarios o maquinaria[23].

2.5. Análisis estadístico para simulación

La validez de un modelo de simulación depende críticamente de que los datos de entrada representen fielmente la realidad estocástica del sistema. Emplear promedios simples oculta la variabilidad, que es justamente la causa principal de la formación de colas; por ello, los tiempos de servicio y de llegada deben modelarse como variables aleatorias con distribuciones de probabilidad ajustadas a los datos observados [25], [31], [36].

Variables aleatorias y distribuciones de probabilidad. Una variable aleatoria es una función que asigna un valor numérico a cada resultado de un fenómeno aleatorio; su comportamiento queda completamente descrito por una distribución de probabilidad, expresada mediante la función de densidad $f(x)$ (caso continuo) o de masa de probabilidad (caso discreto) y la función de distribución acumulada $F(x) = P(X \leq x)$ [25], [31]. En simulación de manufactura, los tiempos de proceso, los tiempos entre llegadas y los tiempos entre fallas se modelan como variables aleatorias continuas [25].

Estadísticos descriptivos y coeficiente de variación. Con una muestra de n observaciones se obtiene la media muestral $\bar{x}$ y la desviación estándar muestral s; con ambas se construye el coeficiente de variación, que expresa de forma adimensional la variabilidad relativa del proceso:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \qquad \text{(Ec. 13)}$$

Su interpretación en teoría de colas es directa [25], [36]: por debajo de 0,10 se consideran procesos muy estables, con tiempos prácticamente constantes; entre 0,10 y 0,30 se habla de variabilidad moderada, propia de operaciones manuales; y por encima de 0,30 los procesos se vuelven muy variables, con

capacidad de generar colas largas. Un CV igual a 1 caracteriza a la distribución exponencial (componente M de la notación de Kendall); valores menores que 1 corresponden a distribuciones tipo Erlang o acotadas, y mayores que 1 a distribuciones hiperexponenciales de alta variabilidad.

Distribuciones **de probabilidad comunes en manufactura.** Las familias de distribuciones más utilizadas para el modelado de datos de entrada son las siguientes [25], [26], [31], [32]:

- **Exponencial:** modela tiempos entre llegadas de un proceso de Poisson y tiempos entre fallas aleatorias; carece de memoria y su CV es igual a 1.
- **Poisson:** distribución discreta del número de eventos por unidad de tiempo cuando los intervalos entre ellos siguen una exponencial.
- **Normal:** adecuada para tiempos de operaciones manuales que surgen de la suma de numerosas subtareas, en virtud del teorema central del límite; debe truncarse para evitar valores negativos.
- **Lognormal:** modela tiempos positivos con asimetría a la derecha, algo común en tareas manuales donde ocasionalmente se presentan demoras largas.
- **Uniforme:** representa el conocimiento mínimo sobre un proceso, cuando solo se conocen los límites inferior y superior.
- **Triangular:** se utiliza cuando además del mínimo y el máximo se dispone de una estimación del valor más probable.
- **Gamma y Erlang** modelan tiempos compuestos por fases sucesivas; la Erlang es el caso particular en que el parámetro de forma es un número entero.
- **Weibull:** distribución estándar en confiabilidad para modelar tiempos hasta la falla y duración de reparaciones de maquinaria.
- **Beta:** distribución acotada en un intervalo [a, b] con gran flexibilidad de formas; es habitual que los ajustadores automáticos la seleccionen para tareas manuales con tiempos limitados por el método de trabajo.

- **Logística:** distribución simétrica similar a la normal, pero con colas más pesadas.
- **Familia Johnson (bounded y unbounded):** sistema de curvas obtenido mediante transformaciones de la normal que permite ajustar cualquier combinación factible de asimetría y curtosis; la variante johnsonbounded es acotada y resulta frecuente en los ajustes de FlexSim para tiempos de tareas manuales [25].

Proceso de ajuste de distribuciones (modelado de entradas). El procedimiento estándar consta de cuatro etapas [25], [31], [54]: Primero se verifica la independencia y homogeneidad de las observaciones. Luego se proponen familias candidatas a partir del histograma, el CV y la asimetría de los datos, para después estimar los parámetros de cada una, normalmente por máxima verosimilitud. Finalmente se evalúa la calidad del ajuste mediante pruebas de bondad de ajuste y criterios de clasificación, seleccionando la distribución mejor calificada.

Pruebas de bondad de ajuste. Determinan si la muestra es estadísticamente compatible con una distribución teórica propuesta. La prueba Chi-Cuadrado [48] compara las frecuencias observadas O_i y esperadas E_i en k intervalos de clase:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \qquad \text{(Ec. 14)}$$

con $k - p - 1$ grados de libertad, siendo p el número de parámetros estimados [31], [32]. La prueba de Kolmogorov-Smirnov [47] es no paramétrica, adecuada para muestras continuas, y evalúa la distancia máxima entre la función de distribución acumulada empírica $F_n(x)$ y la teórica $F_0(x)$:

$$D_n = \max|F_n(x) - F_0(x)| \qquad \text{(Ec. 15)}$$

En ambas pruebas, un p-valor mayor que el nivel de significancia indica que no existe evidencia para rechazar la distribución propuesta [25], [47]. La

prueba K-S es preferida en ciertos contextos porque no depende del agrupamiento de los datos en intervalos, a diferencia de la Chi-Cuadrado [25], [32].

Herramientas de ajuste automático. Debido a la complejidad de los cálculos manuales, se emplean herramientas especializadas que automatizan el procedimiento completo. ExpertFit, desarrollado por Law [25], y la utilidad ExpertFit integrada en FlexSim [8], [24], [33] analizan los datos crudos, estiman los parámetros de decenas de familias por máxima verosimilitud, las clasifican según su ajuste estadístico (pruebas $K-S$ y χ^2, log-verosimilitud y error cuadrático) y entregan la expresión paramétrica lista para ser ingresada en el campo de tiempo de proceso del objeto correspondiente del simulador.

2.6. Teoría de restricciones

La Teoría de Restricciones (TOC) postula que el rendimiento global de cualquier sistema productivo está limitado por un número muy pequeño de recursos: las restricciones o cuellos de botella[34], [35].

2.6.1. Conceptos fundamentales

La mejora de un sistema no se logra optimizando cada componente individualmente, sino gestionando la restricción principal que dicta el ritmo de producción. Todo esfuerzo de mejora que no se enfoque en la restricción es una ilusión óptica en términos de ganancia neta para la compañía.

2.6.2. Identificación de cuellos de botella

En el contexto de simulación, un cuello de botella se manifiesta como el recurso con la mayor tasa de utilización o donde se acumula la mayor cantidad de inventario en proceso (cola). FlexSim permite visualizar estos puntos críticos mediante gráficos de estado y acumulación de colas, facilitando su detección dinámica[33].

2.6.3. Métodos de optimización de restricciones

Una vez identificado el cuello de botella mediante simulación, las estrategias de optimización incluyen subordinar los demás recursos a su ritmo, elevar su capacidad (agregar turnos, reducir paradas) o rediseñar el flujo para balancear la línea. La simulación permite probar estos escenarios "virtualmente" antes de invertir en cambios físicos[36].

2.7. Procesos textiles

2.7.1. Características de la producción textil

La industria textil se caracteriza por procesos complejos que incluyen hilado, tejido, teñido y confección. Son sistemas intensivos en mano de obra y maquinaria, donde la variabilidad en la demanda y los tiempos de preparación (setup) impactan significativamente en la eficiencia. La sostenibilidad y la reducción de desperdicios son tendencias actuales que requieren una planificación precisa[33], [37].

2.7.2. Indicadores de desempeño industrial

Para medir y evaluar la eficiencia en este sector, se emplean indicadores clave (KPIs) derivados de la teoría de colas y la simulación: Tiempo de Ciclo (Lead Time), Nivel de Inventario en Proceso (WIP), Tasa de Producción (Throughput) y Eficiencia de los recursos. La reducción del WIP y del tiempo de ciclo son objetivos centrales para mejorar la competitividad y respuesta al mercado[33], [34].

2.8. Marco legal

El desarrollo de esta investigación y la propuesta de mejora del sistema productivo se encuadran dentro de la normativa legal vigente, garantizando el cumplimiento de estándares de calidad, seguridad y responsabilidad ambiental.

2.8.1. Normativa Internacional y Estandarización

Según la literatura técnica revisada, la competitividad en el sector manufacturero y textil exige el cumplimiento de estándares globales que son reconocidos en el Ecuador:

- Normas ISO 9000 y 9001 (Gestión de la Calidad): Las fuentes destacan que los principios de gestión de calidad son reglas y valores fundamentales aceptados para guiar la mejora de procesos. La adopción de estas normas permite a las empresas cumplir con estándares de calidad frente a competidores internacionales [38], [39].
- Normas ISO 14000 (Gestión Ambiental): Se identifica en la literatura la importancia de la serie ISO 14000 para sistemas de administración ambiental, crucial para reducir impactos en la industria.
- Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU: La investigación en la industria textil moderna se alinea con la "Agenda 2030", específicamente con el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) y el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) [6], [40].

2.8.2. Legislación sobre Seguridad y Salud Ocupacional

La teoría de la ingeniería industrial enfatiza la ergonomía y la seguridad para evitar lesiones y mejorar la eficiencia.

- NIOSH (Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional) para prácticas de trabajo seguro, como el levantamiento de cargas, para evitar lesiones en los operarios [49]. También se destaca que la industria de alimentos y manufactura presenta altas incidencias de lesiones si no se regula adecuadamente.
- Reglamento de Seguridad y Salud de los Trabajadores y Mejoramiento del Medio Ambiente de Trabajo (Decreto Ejecutivo 2393) y las resoluciones vigentes del IESS [41].

2.8.3. Legislación Laboral y Contratación

El análisis de capacidad y planificación agregada requiere considerar las restricciones legales sobre la fuerza laboral.

- Código del Trabajo del Ecuador (artículos sobre jornada laboral, horas suplementarias y extraordinarias, y tipos de contratos vigentes) [42].

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo y enfoque de investigación

La investigación se abordó desde una naturaleza aplicada, dado que el objetivo fundamental fue proponer y evaluar una solución técnica específica orientada a transformar la realidad operativa de la empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda., buscando la optimización de sus tiempos de espera y el flujo productivo.

El enfoque metodológico fue de tipo mixto, integrando dimensiones cuantitativas y cualitativas. El componente cuantitativo resultó predominante, dado que el modelado del proceso completo de producción de pantalones (ACT 1 a ACT 11) requirió la recolección rigurosa de datos estadísticos de todas las áreas productivas. El componente cualitativo se incorporó a través de la observación directa, permitiendo comprender la disciplina de la cola, la lógica secuencial operativa y el mecanismo de servicio dentro de la planta [22], [23].

El diseño fue de carácter no experimental y transversal: se observó el comportamiento estocástico del sistema en su entorno natural durante un periodo determinado, sin manipular directamente las variables en la planta física [23].

3.2. Diseño metodológico

La estructura central del estudio integra los fundamentos analíticos de la Teoría de Colas con la Simulación de Eventos Discretos (DES). La Teoría de Colas, con las fórmulas del Capítulo II, provee el diagnóstico inicial y la referencia teórica. La DES en FlexSim permite evaluar el impacto de las modificaciones operativas en W_q y L_q en el proceso completo sin interrumpir el funcionamiento real del sistema [22].

Las etapas del proceso metodológico se desarrollaron de manera secuencial, en el siguiente orden:

1. Levantamiento del proceso: mapeo de las 11 actividades (ACT 1–11) a través de observación in situ, con construcción de la tabla de proceso y el diagrama de flujo.
2. Recolección de datos: cronometraje de los tiempos de servicio (μ) en cada tarea y área, junto con la medición de los tiempos entre llegadas de lotes (λ) en cada estación.
3. Ajuste estadístico: la distribución de probabilidad de cada tarea se ajustó con la función ExpertFit de FlexSim.
4. Diagnóstico analítico con teoría de colas: a partir de las distribuciones ajustadas se calcularon el factor de utilización (ρ) y las medidas de espera (Lq, Wq) de cada estación, con el fin de localizar los cuellos de botella y clasificar el sistema según la notación de Kendall, antes de construir el modelo de simulación.
5. Construcción del modelo en FlexSim: el proceso completo se tradujo al entorno 3D, respetando el límite de 100 tokens de licencia.
6. Verificación y validación: mediante una prueba t (Ec. 12) se contrastó el throughput simulado frente a la capacidad analítica del sistema (194 und/turno) obtenida por teoría de colas.
7. Lectura de dashboards: los gráficos State Pie, Queue Content y Time Plot se interpretaron para corroborar el diagnóstico de colas con los resultados de la simulación.
8. Experimentación de escenarios de mejora: se evaluaron al menos 3 escenarios, calculando IM% (Ec. 11) y CT (Ec. 10), y se seleccionó el óptimo verificando la hipótesis.

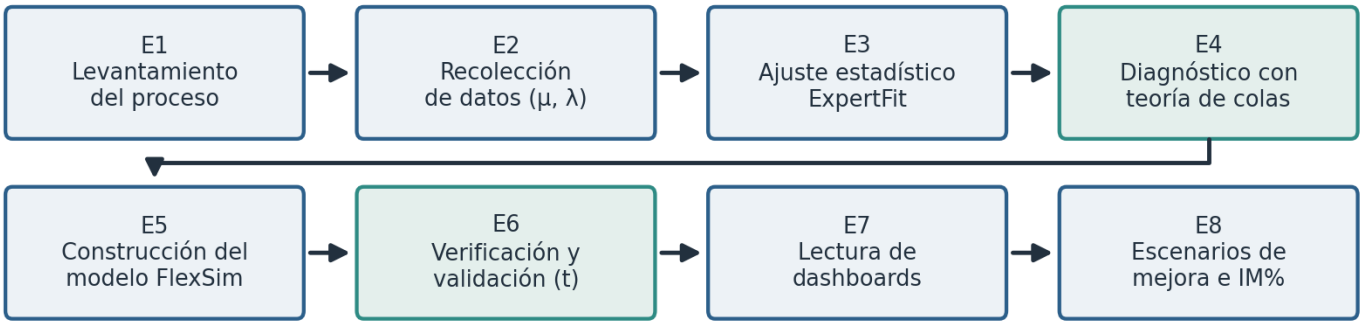


Figura 2. Etapas metodológicas del estudio (E1–E8).

Fuente: elaboración propia.

3.3. Materiales y sujeto de estudio

El sujeto de estudio lo constituyó el **flujo de valor completo de la línea de producción de pantalones** de Tempocodeca Cía. Ltda., comprendido por las 11 actividades que van desde el retiro de tela en bodega (ACT 1) hasta el almacenamiento final (ACT 11). Mediante el mapeo *in situ* del proceso, se caracterizó la infraestructura y la distribución de los **21 operarios** que conforman los servidores del sistema, identificando cuatro macro-áreas operativas (Tabla I).

Tabla I. Caracterización de áreas operativas — Tempocodeca Cía. Ltda.

Área	ACT	N.° de equipos	Operarios (c)	Rol en el sistema
Corte	1–5	5	6	Fuente alimentadora del flujo (nivel lote)
Confección	6	10	10	Transformación principal de la prenda (línea en serie)
Calidad	7–8	2	2	Inspección y acabado de la prenda
Empaque	9–11	3	3	Terminación, etiquetado y despacho

Fuente: elaboración propia.

3.4. Descripción del proceso productivo

El proceso de producción de pantalones de Tempocodeca Cía. Ltda. comprende 11 actividades organizadas en cuatro áreas. La Tabla II presenta el levantamiento completo del proceso con las tareas elementales, los recursos asignados y el objeto FlexSim correspondiente a cada actividad.

Tabla II. Descripción del proceso de producción de pantalones.

Área	ACT	Tareas elementales
CORTE	*ACT 1*	1.1 Identificar rollo de tela 1.2 Transporte a estación
	ACT 2	2.1 Diseño del molde · 2.2 Programación Plotter 2.3 Almacenar molde
	ACT 3	3.1 Tendido de tela 3.2 Colocar molde 3.3 Fijar molde
	ACT 4	4.1 Corte recto de piezas 4.2 Corte curvo 4.3 Separar desperdicio
	ACT 5	5.1 Organizar corte 5.2 Descartar sobrante 5.3 Clasificar por talla
CONFECCIÓN	*ACT 6*	6.1 Unión tiro trasero 6.2 Coser cierre 6.3 Unión tiro delantero 6.4 Coser bolsillo 6.5 Unión bolsillo 6.6 Ojales 6.7 Unión pierna izq. 6.8 Unión pierna der. 6.9 Pegar bolsillo tras. 6.10 Acabados
CALIDAD	*ACT 7*	7.1 Inspección de costuras 7.2 Registro 7.3 Almacén temporal
	ACT 8	8.1 Corte de hilos sobrantes 8.2 Revisión final 8.3 Limpieza
EMPAQUE	*ACT 9*	9.1 Planchado 9.2 Doblado
	ACT 10	10.1 Etiqueta marca 10.2 Etiqueta talla 10.3 Código de barras
	ACT 11	11.1 Empaque individual 11.2 Caja maestra 11.3 Almacén despachos

Fuente: elaboración propia.

3.5. Estructura del modelo en FlexSim

El modelo de simulación reproduce el proceso completo (ACT 1 a ACT 11) mediante objetos interconectados.

Tabla III. Estructura de objetos FlexSim / proceso completo

ACT	Objeto	Nombre	Recursos	Tokens
Generador	*Source*	Telas	1 source	1
Buffer	*Queue*	Q_Telas	1 rack	1
1	*Processor*	P_Tendido de Tela	1 op. + 1 processor	2
Generador	*Source*	Moldes	1 source	1
2	*Processor*	P_Definicion_Modelo	1 op. + 1 processor	2
Buffer	*Queue*	Q_Moldes	1 almacen	1
3	*Processor*	Pegado de molde	1 op. + 1 combiner	2
4	*Processor*	P_Corte_Piezas	1 op. + 1 processor	2
5	*Processor*	P_Org_Clasificacion	2 op. + 1 processor	3
Buffer	*Queue*	Q_Buffer_Corte_Conf	1 almacen + 1 tansporter	2
Buffer	*Queue*	Q_Buffer_Preparacion_de_corte	1 almacen	1
6.1	*Processor*	P_Union_Tiro_Trasero	1 op. + 1 processor	2
6.2	*Processor*	P_Cierre_Delantero	1 op. + 1 processor	2
6.3	*Processor*	P_Union_Tiro_Delantero	1 op. + 1 processor	2
6.4	*Processor*	P_Coser_Bolsillo	1 op. + 1 processor	2
6.5	*Processor*	P_Union_Bolsillo_Del	1 op. + 1 processor	2
6.6	*Processor*	P_Ojales	1 op. + 1 processor	2
6.7	*Processor*	P_Union_Pierna_Izq	1 op. + 1 processor	2
6.8	*Processor*	P_Union_Pierna_Der	1 op. + 1 processor	2
6.9	*Processor*	P_Bolsillo_Trasero	1 op. + 1 processor	2
6.10	*Processor*	P_Acabados_Finales	1 op. + 1 processor	2
Buffer	*Queue*	Q_Buffer_Confeccion	1 almacen + 1 transporter	2
Buffer	*Queue*	Q_Buffer_Control_calidad	1 Almacen	1
7	*Processor*	P_Revision_Calidad	1 op. + 1 processor	2
8	*Processor*	P_Corte_hilos	1 op. + 1 processor	2
Buffer	*Queue*	Q_Buffer_Corte_hilos	1 almacen + 1 transporter	2
Buffer	*Queue*	Q_Buffer_Acabados	1 almacen	1
9	*Processor*	P_Planchado	1 op. + 1 processor	2
Buffer	*Queue*	Q_Buffer_Planchado	1 almacen	1
Generador	*Source*	Etiquetas	1 source	1
Buffer	*Queue*	Q_Etiquetas	1 almacen	1
10	*Processor*	P_Etiquetado	1 op. + 1 combiner	2
Buffer	*Queue*	Q_Buffer_Etiquetado	1 almacen + 1 transporter	2
Buffer	*Queue*	Q_Buffer_Preparacion_Empaque	1 almacen	1
Generador	*Source*	Empaques	1 source	1
Buffer	*Queue*	Q_Empaques	1 almacen	1
11	*Combiner*	P_Empaque	1 op. + 1 combiner	2
Buffer	*Queue*	Q_Buffer_Empaque	1 almacen	1

Fuente: elaboración propia.

Total, aproximado: 42 objetos fijos + 21 Operators ≈ 63 tokens base. Con conectores y Dashboards obtenemos un aproximado de 75–80 tokens. Con un margen: 20–25 tokens para escenarios de mejora [22].

3.6. Recolección de datos — todas las áreas productivas

3.6.1. Variables medidas y método

La recolección de datos se apoyó en la **inspección de registros** y la **observación directa mediante estudio de tiempos y movimientos** con cronómetro digital en las cuatro áreas del proceso. Se estableció un mínimo de **n = 60 observaciones por tarea**, cumpliendo el criterio de representatividad para pruebas de bondad de ajuste [33], [34]. **Todas las unidades de tiempo están expresadas en segundos (s)**.

3.6.2. Área de Corte — ACT 1 a ACT 5

En el área de Corte, las operaciones ACT 1 a ACT 5 se ejecutan sobre el lote completo de tela (aproximadamente 260 piezas simultáneas por tendido). El tiempo de proceso unitario se calculó dividiendo la duración total de cada operación, medida con cronómetro, entre el número de piezas del lote, obteniendo así el tiempo unitario por pieza en segundos. Este procedimiento, denominado normalización por lote, es el estándar para operaciones que procesan múltiples unidades de forma simultánea y permite mantener la coherencia de las unidades con el resto del sistema [25], [31]. En cuanto a la equivalencia de unidades, cada pantalón se compone de cuatro piezas principales de tela (dos delanteros y dos posteriores), de modo que los cuatro tendidos de 260 piezas procesados por jornada corresponden a las 260 prendas diarias que demanda el flujo (sección 3.8.1).

Tabla IVa. Tiempos de servicio, Área de Corte (n = 60)

ACT	*Tarea*	Tiempos registrados (s)
1	*P_tendido_de_Tela*	4.85, 4.31, 4.35, 4.77, 5.00, 5.26, 6.27, 4.73, 4.25, 4.10, 4.95, 4.26, 4.13, 3.75, 4.76, 4.64, 6.02, 5.15, 3.61, 3.53, 5.54, 3.99, 4.81, 4.80, 4.67, 5.49, 3.81, 4.66, 4.82, 3.65, 4.76, 3.41, 3.69, 4.09, 4.71, 4.21, 4.04, 4.81, 5.46, 4.38,

2	*P_Definicion_Modelo*	3.62, 5.32, 4.35, 4.48, 3.20, 4.34, 4.50, 4.16, 3.98, 4.39, 4.95, 4.84, 4.12, 4.02, 4.58, 4.00, 3.60, 4.34, 3.92, 4.35 8.49, 7.96, 7.95, 7.79, 8.60, 8.82, 6.67, 7.58, 8.07, 6.88, 7.12, 6.89, 6.81, 6.63, 6.84, 9.64, 7.03, 7.97, 7.30, 8.23, 6.67, 6.84, 7.10, 6.87, 7.50, 7.12, 7.60, 7.33, 7.28, 6.14, 8.26, 6.81, 7.23, 8.44, 8.88, 7.03, 7.39, 5.97, 7.77, 7.79, 8.02, 6.77, 8.91, 8.30, 6.60, 7.17, 6.39, 7.18, 7.22, 6.60, 7.83, 6.24, 6.46, 7.04, 7.74, 6.42, 5.66, 6.88, 7.81, 7.83
3	*Pegado de molde*	3.94, 3.75, 4.03, 3.64, 4.02, 3.96, 4.01, 3.84, 5.21, 4.00, 4.62, 4.00, 4.64, 4.61, 3.86, 3.84, 4.41, 4.23, 4.57, 3.80, 4.63, 4.66, 3.83, 4.21, 3.70, 4.17, 4.19, 4.23, 5.70, 3.40, 4.03, 4.45, 4.38, 4.00, 4.51, 3.87, 4.30, 4.01, 4.38, 4.22, 3.91, 5.06, 4.00, 4.28, 3.56, 3.87, 4.00, 3.44, 4.04, 4.47, 4.72, 3.69, 3.82, 4.38, 3.96, 4.30, 4.52, 4.42, 4.32, 4.24
4	*P_Corte_Piezas*	7.47, 7.27, 5.61, 6.15, 5.95, 5.97, 7.08, 7.07, 7.27, 5.98, 7.55, 7.26, 7.67, 5.37, 6.14, 4.39, 7.25, 6.20, 7.11, 6.04, 4.33, 5.78, 10.30, 7.20, 6.00, 7.59, 6.93, 6.85, 8.67, 6.47, 3.62, 5.33, 5.32, 6.17, 6.11, 6.15, 8.52, 7.93, 5.13, 8.12, 7.02, 5.84, 6.15, 8.09, 5.80, 6.64, 7.48, 7.20, 6.44, 5.76, 8.18, 7.80, 6.20, 7.79, 6.62, 9.44, 8.04, 6.14, 5.94, 6.62
5	*P_Org_Clasificacion*	2.46, 3.52, 3.29, 2.67, 2.14, 3.55, 5.12, 6.11, 3.49, 5.26, 4.42, 3.59, 2.37, 3.52, 4.48, 4.32, 2.42, 3.72, 4.26, 2.17, 3.52, 3.23, 4.58, 3.48, 3.39, 3.55, 4.71, 3.16, 2.97, 3.63, 2.76, 5.63, 2.78, 3.92, 4.59, 3.76, 5.07, 4.93, 5.07, 2.04, 4.30, 3.88, 2.49, 3.61, 4.20, 3.50, 7.30, 4.38, 2.82, 2.80, 5.76, 4.06, 5.03, 4.43, 2.49, 2.55, 3.25, 4.44, 3.57, 3.82

Fuente: elaboración propia.

3.6.3. Área de Confección — ACT 6

Tabla IVb. Tiempos de servicio, Área de Confección ACT 6 (n = 60)

ACT – 6	Tarea	Tiempos registrados (s)
6.1	*P_Union_Tiro_Trasero*	48, 56, 47, 44, 46, 45, 46, 45, 52, 46, 52, 47, 51, 48, 49, 45, 47, 46, 44, 45, 48, 46, 46, 48, 50, 54, 49, 49, 46, 47, 44, 47, 48, 45, 45, 48, 50, 44, 44, 48, 45, 44, 56, 47, 49, 44, 45, 49, 48, 48, 43, 48, 45, 49, 47, 50, 46, 43, 47, 48
6.2	*P_Cierre_Delantero*	30, 24, 33, 28, 25, 24, 24, 29, 26, 31, 23, 27, 24, 28, 30, 26, 21, 33, 33, 30, 28, 22, 24, 30, 26, 25, 22, 27, 28, 28, 25, 28, 28, 23, 29, 26, 27, 32, 28, 28, 27, 25, 26, 36, 27, 28, 27, 25, 30, 30, 26, 31, 28, 27, 29, 26, 26, 27, 28, 27
6.3	*P_Union_Tiro_Delantero*	94, 103, 99, 91, 94, 94, 98, 90, 83, 83, 88, 104, 92, 86, 97, 90, 107, 94, 83, 95, 87, 94, 93, 93, 94, 93, 95, 87, 98, 95, 96, 103, 95, 88, 87, 93, 88, 92, 94, 95, 88,

6.4	*P_Coser_Bolsillo*	91, 97, 98, 89, 89, 97, 92, 100, 93, 98, 89, 90, 90, 99, 95, 86, 93, 94, 90 122, 127, 129, 137, 127, 127, 121, 138, 124, 124, 131, 123, 128, 124, 131, 117, 131, 122, 129, 125, 121, 127, 130, 136, 130, 124, 135, 135, 123, 130, 124, 132, 129, 119, 133, 125, 123, 133, 136, 125, 127, 144, 123, 121, 127, 131, 124, 129, 127, 122, 146, 122, 130, 134, 133, 130, 117, 135, 133, 131
6.5	*P_Union_Bolsillo_Del*	48, 65, 49, 45, 42, 49, 46, 51, 49, 49, 46, 48, 47, 49, 44, 48, 56, 49, 52, 48, 45, 43, 51, 47, 47, 47, 51, 46, 56, 46, 69, 51, 42, 47, 47, 51, 50, 49, 51, 47, 51, 43, 49, 50, 55, 50, 46, 50, 47, 44, 46, 47, 44, 45, 44, 51, 47, 48, 51, 45
6.6	*P_Ojales*	10, 6, 8, 8, 12, 10, 8, 10, 8, 6, 7, 12, 9, 6, 8, 9, 9, 9, 8, 8, 9, 10, 5, 11, 7, 10, 7, 8, 7, 9, 10, 9, 10, 7, 10, 9, 8, 7, 9, 9, 6, 7, 8, 9, 8, 12, 8, 6, 9, 9, 8, 9, 7, 7, 8, 9, 8, 8, 7, 6
6.7	*P_Union_Pierna_Izq*	44, 28, 30, 47, 26, 26, 40, 36, 31, 29, 28, 31, 39, 31, 29, 30, 37, 24, 44, 23, 35, 46, 37, 31, 40, 26, 30, 44, 32, 42, 30, 25, 35, 33, 39, 36, 38, 30, 29, 31, 31, 31, 34, 30, 30, 42, 34, 25, 23, 31, 20, 42, 25, 26, 27, 24, 39, 31, 40, 46
6.8	*P_Union_Pierna_Der*	60, 59, 52, 48, 52, 56, 61, 57, 51, 56, 54, 54, 54, 58, 57, 50, 54, 55, 50, 55, 65, 56, 58, 58, 60, 60, 60, 58, 62, 55, 56, 62, 54, 54, 53, 52, 56, 66, 56, 61, 50, 56, 55, 59, 59, 54, 56, 52, 55, 60, 54, 59, 50, 56, 53, 56, 51, 51, 56, 57
6.9	*P_Bolsillo_Trasero*	16, 19, 16, 22, 27, 16, 21, 19, 14, 21, 23, 20, 18, 21, 13, 25, 21, 22, 15, 21, 17, 22, 23, 17, 25, 17, 23, 28, 19, 21, 21, 22, 21, 13, 11, 23, 22, 24, 20, 19, 18, 14, 20, 17, 23, 17, 28, 23, 26, 15, 23, 20, 15, 24, 15, 16, 21, 26, 11, 19
6.10	*P_Acabados_Finales*	55, 60, 58, 56, 59, 54, 62, 57, 56, 58, 61, 53, 57, 59, 56, 60, 55, 58, 57, 56, 59, 54, 61, 57, 58, 56, 60, 55, 57, 59, 56, 58, 62, 53, 57, 59, 56, 58, 62, 53, 57, 59, 56, 60, 55, 58, 57, 56, 59, 54, 61, 57, 58, 56, 60, 55, 57, 59, 56, 58, 62, 53, 57, 59, 56, 60

Fuente: elaboración propia.

3.6.4. Área de Calidad e Hilos — ACT 7 y ACT 8

Tabla IVc. Tiempos de servicio — Área de Calidad (n = 60)

ACT	Tarea	Tiempos (s)
7	*P_Revision_Calidad*	159, 157, 146, 147, 140, 156, 149, 136, 140, 146, 136, 149, 154, 164, 147, 149, 156, 138, 157, 149, 142, 161, 153, 153, 150, 141, 145, 158, 140, 136, 150, 139, 145, 150, 156, 148, 147, 163, 150, 146, 147, 148, 161, 144, 139, 134, 147, 152, 151, 153, 156, 143, 152, 147, 147, 147, 138, 144, 158, 145

8	*P_Corte_hilos*	119, 114, 112, 115, 112, 120, 118, 120, 117, 132, 121, 124, 117, 117, 110, 109, 112, 115, 116, 117, 120, 114, 117, 108, 119, 112, 120, 116, 119, 111, 109, 117, 115, 116, 117, 114, 123, 115, 112, 104, 105, 117, 109, 113, 115, 117, 122, 119, 117, 119, 119, 111, 126, 119, 111, 116, 116, 113, 115, 122

Fuente: elaboración propia.

3.6.5. Área de Empaque — ACT 9 a ACT 11

Tabla IVd. Tiempos de servicio — Área de Empaque (n = 60)

ACT	Tarea	Tiempos (s)
9	*P_Planchado*	75, 73, 78, 75, 73, 75, 73, 69, 77, 75, 67, 71, 70, 72, 70, 71, 71, 76, 69, 72, 74, 71, 73, 76, 71, 73, 71, 72, 84, 69, 75, 72, 72, 72, 71, 75, 70, 74, 69, 69, 71, 70, 73, 74, 72, 70, 70, 71, 75, 73, 70, 72, 70, 69, 73, 69, 70, 74, 72, 70
10	*P_Etiquetado*	14, 16, 11, 25, 17, 20, 17, 20, 17, 13, 17, 14, 15, 21, 18, 19, 18, 16, 17, 19, 17, 19, 17, 17, 15, 16, 12, 16, 22, 17, 14, 16, 14, 22, 16, 15, 15, 15, 18, 20, 19, 16, 18, 13, 17, 15, 19, 17, 14, 15, 15, 17, 19, 13, 20, 17, 15, 15, 18, 16
11	*P_Empaque*	48, 54, 48, 50, 45, 51, 50, 51, 51, 48, 53, 50, 48, 46, 50, 53, 50, 52, 47, 50, 48, 46, 61, 52, 45, 54, 44, 53, 44, 48, 49, 47, 52, 48, 52, 46, 49, 44, 52, 52, 47, 48, 49, 50, 47, 52, 49, 55, 47, 52, 44, 47, 50, 50, 54, 49, 55, 46, 56, 54

Fuente: elaboración propia.

En la fase de terminación del área de empaque, se establece un punto de decisión crítico basado en las especificaciones de diseño de la prenda. No todas las unidades requieren el tratamiento térmico y químico de la estación de lavado; en aquellos casos donde la unidad no requiere dicho tratamiento, el flujo de producción se dirige de manera directa hacia la estación de planchado a vapor. El lavado constituye un servicio externo a la línea estudiada, por lo que queda fuera del alcance del modelo (sección 4.7.2).

3.6.6. Tiempos entre llegadas de lotes (λ) — todas las áreas

Los tiempos entre llegadas de lotes (λ) son tan críticos como los tiempos de servicio (μ). Sin λ no se puede calcular ρ ni W*q* analíticamente, y el objeto Source de FlexSim no puede parametrizarse correctamente.



Ilustración 1. Vista general de la línea de producción de pantalones de Tempocodeca Cía. Ltda.

Tabla IVe. Tiempos entre llegadas de lotes de todas las áreas (n = 30)

Punto de medición	λ estimada	Tiempos entre llegadas t_a (s)

Entrada al proceso — inicio Corte	*0.5 lotes/hora*	7161, 7183, 7090, 7268, 7090, 7217, 7047, 7322, 7258, 7181, 7426, 7081, 7237, 7148, 7230, 7297, 7151, 7075, 7152, 7244, 7207, 7077, 7176, 7230, 7343, 7366, 7213, 7206, 7298, 7263
Entrada Confección — desde Corte	*1.60 lotes/hora*	2220, 2232, 2206, 2246, 2174, 2231, 2260, 2227, 2220, 2204, 2206, 2243, 2215, 2267, 2223, 2244, 2259, 2255, 2139, 2288, 2208, 2231, 2263, 2182, 2256, 2283, 2272, 2253, 2261, 2191
Entrada Calidad — desde Confección	*32 und/h*	110, 108, 112, 113, 109, 112, 109, 112, 109, 110, 104, 109, 111, 110, 105, 109, 112, 110, 109, 113, 108, 108, 109, 108, 110, 109, 110, 112, 106, 110
Entrada Empaque — desde Calidad	*32 und/h*	109, 106, 106, 111, 110, 111, 113, 109, 110, 108, 110, 109, 108, 108, 110, 109, 107, 106, 110, 110, 113, 108, 109, 114, 111, 116, 108, 109, 109, 109

Fuente: elaboración propia.

3.7. Ajuste estadístico con ExpertFit de FlexSim

Con los datos de las Tablas IVa–IVe recolectados, el ajuste de distribuciones de probabilidad se realizó mediante la función **ExpertFit integrada en FlexSim**. Esta función evalúa automáticamente las distribuciones Normal, Exponencial, Weibull, Gamma, Lognormal, Uniforme y Triangular, y selecciona la de mejor ajuste mediante K-S (Ec. 15), χ^2 (Ec. 14), Log-likelihood y error cuadrático mínimo [24], [33].

Tabla V. Resultados del ajuste estadístico por tarea

TAREAS	n	Media (s)	Desv. estándar (σ)	CV	Distribución	Notación FlexSim (ingresar en Processor)
Tendido de Tela	60	4.46	0.62	0.140	lognormal	lognormal(-0.76, 1.64, 0.12)
Definición de modelo	60	7.37	0.80	0.109	beta	beta(5.84, 10.40, 2.36, 4.66)
Pegado de molde	60	4.18	0.42	0.100	beta	beta(3.50, 5.77, 2.10, 4.97)
Corte de piezas	60	6.71	1.20	0.178	beta	beta(4.33, 10.72, 2.80, 4.66)
Organización y clasificación	60	3.81	1.07	0.281	lognormal	lognormal(-2.65, 1.85, 0.16)
6.1 Unión tiro trasero	60	47.27	2.83	0.060	beta	beta(42.29, 56.46, 2.28, 4.42)
6.2 Coser cierre delantero	60	27.32	2.94	0.108	laplace	laplace(27.21, 2.46)
6.3 Unión tiro delantero	60	93.05	5.10	0.055	logistic	logistic(92.96, 2.93)

6.4 Coser bolsillo	60	128.22	5.96	0.047	beta	beta(116.40, 146.63, 2.35, 3.70)
6.5 Unión bolsillo delantero	60	48.60	4.63	0.095	logistic	logistic(48.03, 1.93)
6.6 Ojales	60	8.35	1.54	0.184	johnsonunbounded	johnsonunbounded(8.47, 3.82, 0.07, 2.55)
6.7 Unión pierna izquierda	60	32.88	6.68	0.203	gamma	gamma(20.60, 4.28, 2.96)
6.8 Unión pierna derecha	60	55.90	3.77	0.067	lognormal	lognormal(10.23, 3.82, 0.08)
6.9 Pegar bolsillo trasero	60	19.82	4.07	0.205	johnsonunbounded	johnsonunbounded(27.59, 8.47, 2.12, 2.71)
6.10 Acabados finales	60	57.45	2.30	0.040	beta	beta(52.29, 63.95, 2.53, 3.17)
Revisión y limpieza de prenda	60	148.35	7.24	0.049	laplace	laplace(148.14, 6.51)
Corte de hilos	60	115.93	4.89	0.042	logistic	logistic(115.99, 2.62)
Planchado a vapor	60	72.22	2.79	0.039	johnsonbounded	johnsonbounded(66.94, 84.00, 1.21, 1.32)
Etiquetado	60	16.75	2.58	0.154	lognormal	lognormal(-0.97, 2.86, 0.14)
Empaque Final	60	49.70	3.39	0.068	lognormal	lognormal(17.21, 3.48, 0.10)

Fuente: elaboración propia.

Como ilustración del procedimiento, la Figura 3 muestra el histograma de las 60 observaciones de la tarea Coser bolsillo junto con la densidad beta ajustada; el p-valor de la prueba K-S (Ec. 15) es claramente superior a 0,05, de modo que no hay evidencia para rechazar el ajuste [25], [47].

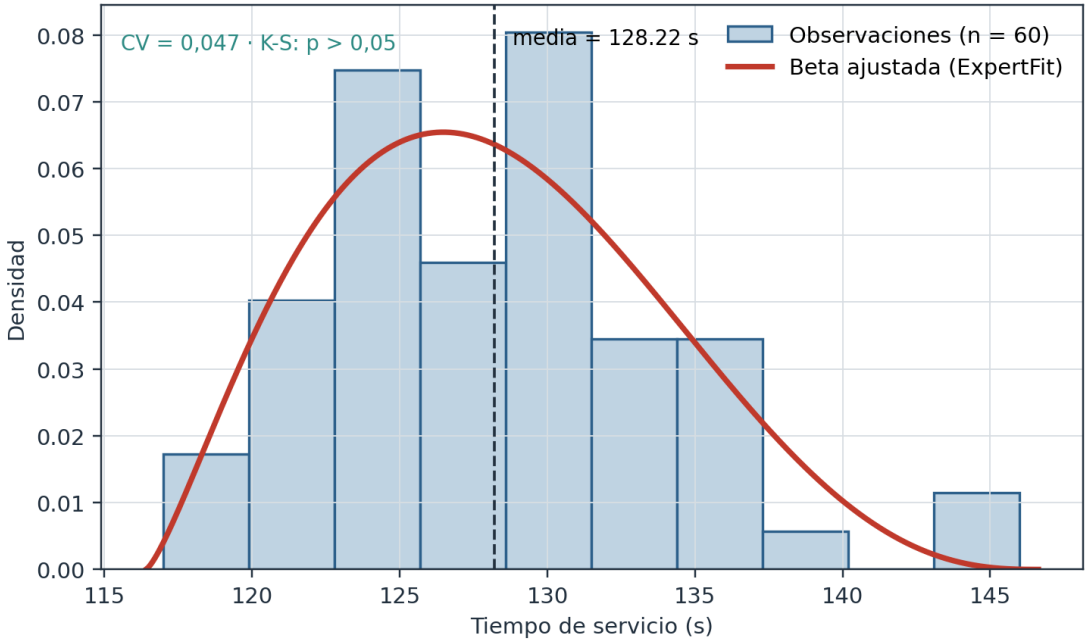


Figura 3. Histograma y distribución ajustada de la tarea Coser bolsillo (ACT 6.4).

Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla IVb. Código de generación en el Anexo D (Python/Matplotlib).

El coeficiente de variación de cada tarea (Ec. 13) se reporta en la Tabla V. Los valores van de 0,039 (Acabados finales y Planchado a vapor) a 0,281 (Organización y clasificación); ninguna tarea supera el umbral de 0,30. Es decir, la variabilidad de los procesos es baja o moderada y queda lejos del comportamiento exponencial (CV = 1), un comportamiento esperable en tareas manuales estandarizadas por el método de trabajo. Este resultado anticipa el diagnóstico: dado que la variabilidad de las tareas es baja, las colas observadas en planta no pueden atribuirse a ella y su origen debe buscarse en la capacidad de las estaciones, cálculo que se desarrolla en la sección 3.8. Las familias seleccionadas por ExpertFit (lognormal, gamma, beta y logística) son coherentes con este diagnóstico [25], [31].

3.8. Aplicación de la teoría de colas: diagnóstico analítico del estado actual

Antes de construir el modelo de simulación se aplicaron las ecuaciones del Capítulo II sobre los datos recolectados (Tablas IVa–IVe y Tabla V). El propósito de este paso es doble: obtener un primer diagnóstico cuantitativo del estado actual y disponer de valores de referencia contra los cuales contrastar después los

resultados de FlexSim [25], [57]. Todos los cálculos se realizaron con las muestras completas (n = 60 por tarea).

3.8.1. Parámetros globales del sistema

Según los registros de producción, al flujo ingresan 260 unidades por turno de 480 min; esto equivale a $\lambda = 0{,}5417$ und/min = 32,5 und/h, con un tiempo medio entre llegadas de 110,8 s por unidad. El valor concuerda con lo medido en planta: los tiempos entre llegadas a la entrada de Calidad promedian 109,5 s (CV = 0,020) y los de Empaque 109,5 s (CV = 0,021), de acuerdo con la Tabla IVe. Un CV tan bajo indica un flujo interno casi determinista ($C_a^2 \approx 0{,}0004$), propio de una línea ritmada. A nivel de lotes, Corte recibe un lote de tela cada 7 207,9 s en promedio (0,50 lotes/h) y Confección recibe un lote desde Corte cada 2 232,0 s (1,61 lotes/h).

La Figura 4 representa el proceso como una red de colas en tándem: la salida de cada área constituye la llegada de la siguiente, con disciplina FIFO y búferes intermedios según la estructura de la Tabla III [59].

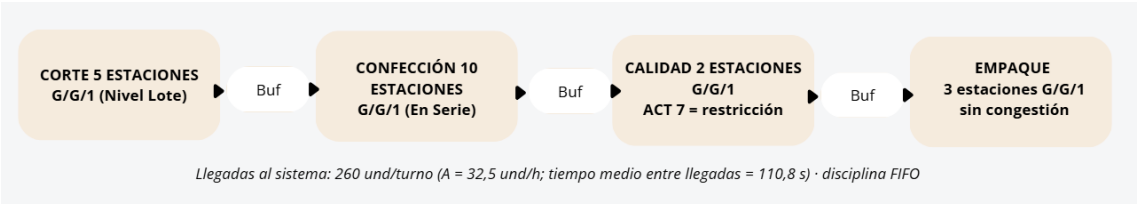


Figura 4. Representación del proceso de producción de pantalones como red de colas en tándem.

Fuente: elaboración propia.

3.8.2. Utilización y capacidad por estación

Dado que las llegadas y los tiempos de servicio de cada estación siguen distribuciones generales, no exponenciales, y cada puesto cuenta con un único operario, el sistema se clasifica como una red de colas G/G/1 en tándem (clasificación detallada en la sección 3.11). Sobre esa base se aplicó el factor de utilización (Ec. 1) con c = 1 (un operario por estación, Tabla III) y $\lambda = 0{,}009028$ und/s a cada estación de flujo unitario (Confección, Calidad y Empaque). A

manera de ejemplo se desarrolla el cálculo para la estación ACT 7, Revisión y limpieza, cuyo tiempo medio de servicio es E[S] = 148,35 s. Su tasa de servicio resulta $\mu = 1/E[S] = 1/148{,}35 = 0{,}006741$ und/s, es decir 24,3 und/h, y la utilización queda $\rho = \lambda/\mu = 0{,}009028/0{,}006741 = 1{,}339$. La capacidad por turno se obtiene dividiendo la jornada entre el tiempo de servicio: 28 800/148,35 = 194 unidades. utilización.

La capacidad por turno resulta de dividir la jornada entre el tiempo de servicio: 28 800/148,35 = 194 unidades. Repitiendo este cálculo para las quince estaciones se obtiene la Tabla VI, cuya columna de utilización se resume gráficamente en la Figura 5.

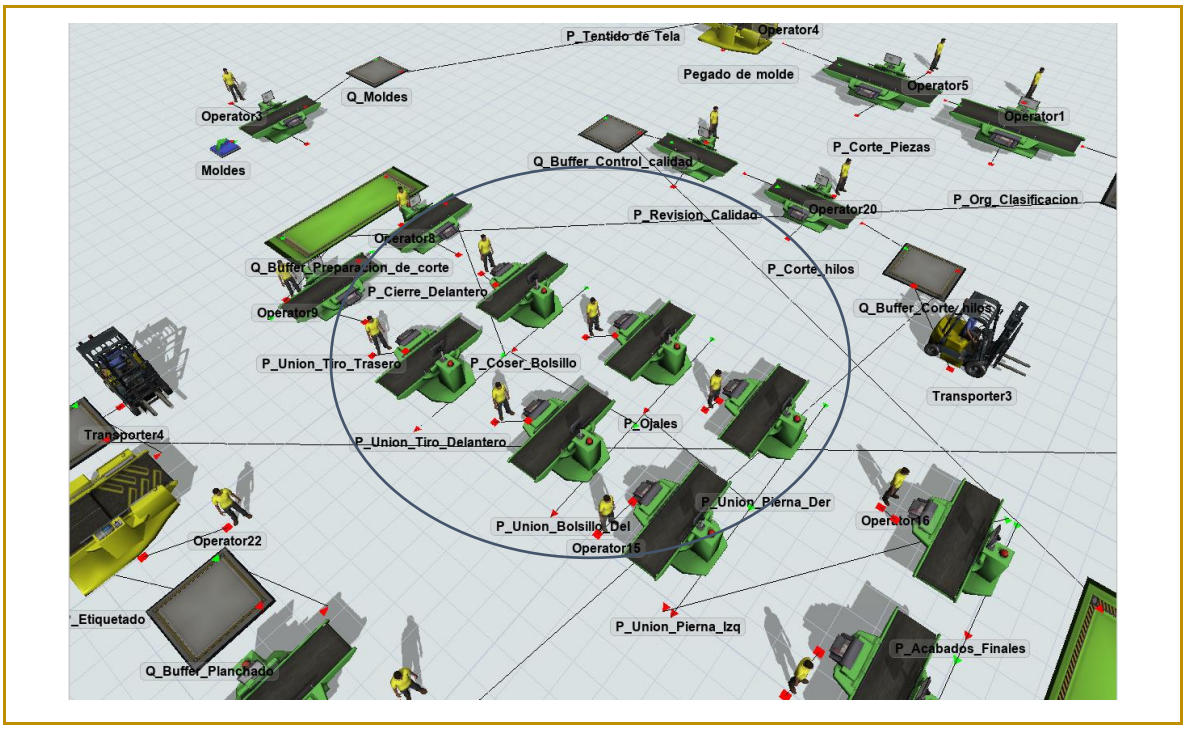


Ilustración 2. Estaciones críticas de la línea.

Tabla VI. Diagnóstico analítico por estación: estado actual (λ = 32,5 und/h)

Estación	E[S] (s)	CV	μ (und/h)	ρ (Ec. 1)	Capacidad (und/turno)	Condición
6.1 Unión tiro trasero	47,27	0,060	76,2	0,427	609	Estable
6.2 Coser cierre delantero	27,32	0,107	131,8	0,247	1 054	Estable
6.3 Unión tiro delantero	93,05	0,055	38,7	0,840	310	Estable
6.4 Coser bolsillo	128,22	0,046	28,1	**1,158**	225	**Inestable (ρ ≥ 1)**

6.5 Unión bolsillo delantero	48,60	0,095	74,1	0,439	593	Estable
6.6 Ojales	8,35	0,184	431,1	0,075	3 449	Estable
6.7 Unión pierna izquierda	32,88	0,203	109,5	0,297	876	Estable
6.8 Unión pierna derecha	55,90	0,068	64,4	0,505	515	Estable
6.9 Pegar bolsillo trasero	19,82	0,205	181,7	0,179	1 453	Estable
6.10 Acabados finales	57,45	0,039	62,7	0,519	501	Estable
7 Revisión y limpieza	148,35	0,049	24,3	**1,339**	194	**Inestable (ρ ≥ 1)**
8 Corte de hilos	115,93	0,042	31,1	**1,047**	248	**Inestable (ρ ≥ 1)**
9 Planchado a vapor	72,22	0,039	49,8	0,652	399	Estable
10 Etiquetado	16,75	0,154	214,9	0,151	1 719	Estable
11 Empaque final	49,70	0,068	72,4	0,449	579	Estable

Fuente: elaboración propia a partir de las Tablas IVa–IVe. E[S].

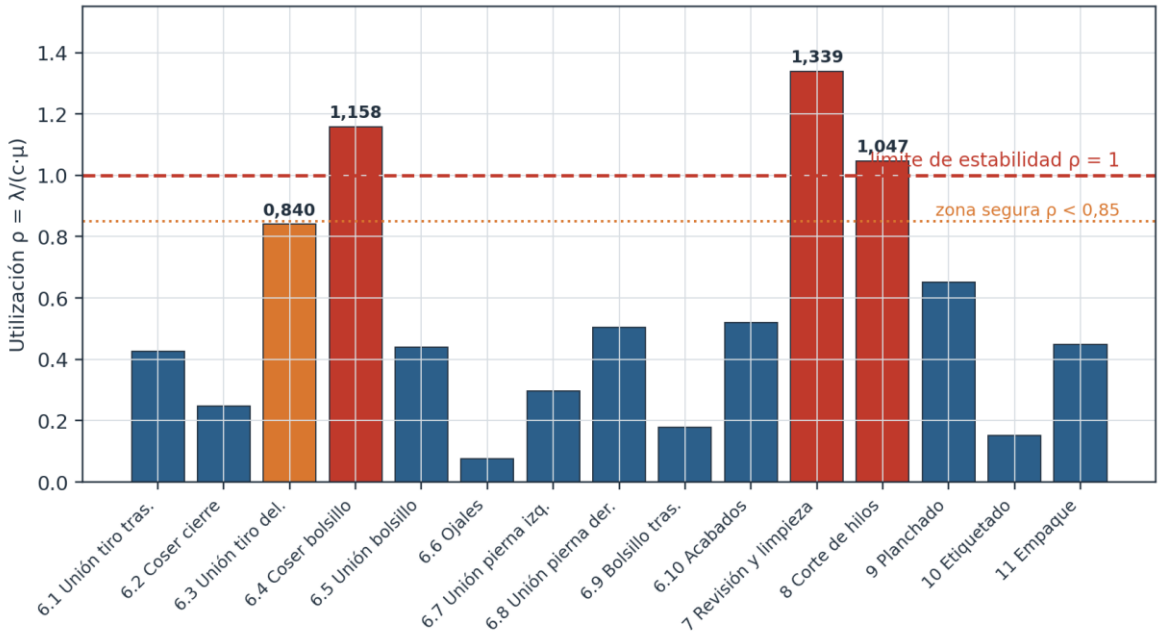


Figura 5. Factor de utilización por estación frente al límite de estabilidad ρ = 1.

Fuente: elaboración propia (Tabla VI). Código de generación en el Anexo D (Python/Matplotlib).

3.8.3. Identificación analítica de los cuellos de botella

Tres estaciones superan el límite de estabilidad frente a la demanda: ACT 6.4 Coser bolsillo (ρ = 1,158), ACT 7 Revisión y limpieza (ρ = 1,339) y ACT 8 Corte de hilos (ρ = 1,047). En ellas no existe estado estable; la demanda excede la capacidad de servicio y la cola crece de forma sostenida durante la jornada [32],

[36]. La capacidad efectiva de todo el sistema queda fijada por la restricción principal, ACT 7: 194 und/turno frente a una demanda de 260 und/turno, un déficit estructural de 66 und/turno (25,3 %). Este resultado es coherente con la Teoría de Restricciones, que establece que la restricción marca el ritmo de todo el sistema [34], [46], y explica un hecho observado en planta: cada jornada inicia con inventario en proceso remanente del día anterior.

Cabe hacer una precisión adicional para una línea en serie como esta: ACT 8 constituye una restricción latente, pues su capacidad (248 und/turno) es inferior a la demanda nominal; sin embargo, en la operación real recibe el flujo ya filtrado por ACT 7 (24,3 und/h), por lo que opera con una utilización efectiva de 0,78. La utilización efectiva de ACT 8 confirma que su carácter restrictivo no se manifiesta en la práctica mientras ACT 7 continúe regulando el flujo aguas arriba, si se eliminara la restricción de ACT 7 sin tocar ACT 8, esta pasaría de inmediato a ser el siguiente cuello de botella; lo mismo vale para ACT 6.4 respecto de las estaciones aguas abajo de Confección [59].

3.8.4. Análisis transitorio de las estaciones saturadas

Como en las estaciones con $\rho \geq 1$ las medidas de estado estable no están definidas, se recurre a la aproximación fluida (Ec. 9) para una jornada de T = 480 min, considerando el efecto en serie del flujo (cada estación saturada recibe como llegada la salida de la anterior). Para ACT 6.4, la estación recibe 32,5 und/h y procesa 28,1 und/h, por lo que acumula $Nq(T) = (32{,}5 - 28{,}1) \times 8 \approx 35{,}4$ unidades por turno; la espera media de las unidades que llegan durante la jornada es $(\rho - 1)\cdot T/2 = (1{,}158 - 1) \times 480/2 \approx 37{,}8$ min, y la última unidad del turno llega a esperar cerca de 75,6 min. En ACT 7, que recibe la salida de Confección (28,1 und/h) y procesa 24,3 und/h, se acumulan unas 30,5 unidades por turno, con una espera media de 37,7 min que alcanza 75,4 min para la última unidad de la jornada. ACT 8, en cambio, recibe de ACT 7 un caudal de 24,3 und/h, inferior a su propia capacidad (31,1 und/h), razón por la cual no acumula inventario propio dentro de la operación en serie —con una utilización efectiva de 0,78— aunque continúa siendo una restricción latente. En conjunto, estos valores muestran que

una prenda que atraviesa las estaciones críticas espera en cola, en promedio, alrededor de 75,5 min (≈ 1,3 h) por turno, una espera que se incrementa a lo largo de la jornada hasta superar las 2,5 h para las últimas unidades.

La acumulación total de trabajo en proceso ronda las 66 unidades por turno, equivalente al déficit global entre demanda y capacidad. Estos valores constituyen la línea base del estado actual ($W_{q,actual}$) contra la que se evaluará el IM% (Ec. 11) de los escenarios de mejora.

3.8.5. Esperas en las estaciones estables

Para las estaciones con $\rho < 1$ se aplicó la aproximación de Kingman (Ec. 7) con $C_a^2 \approx 0{,}0004$ (flujo casi determinista, Tabla IVe) y los CV de la Tabla V [12], [61]. El contraste es claro: incluso en la estación estable más cargada, ACT 6.3 ($\rho = 0{,}840$), la espera media en cola apenas llega a $Wq \approx 0{,}8$ s, y en el resto no llega a 0,4 s. Con CV $\leq$ 0,28 en todas las tareas, prácticamente toda la congestión del sistema se concentra en las estaciones saturadas. En consecuencia, el problema de Tempocodeca Cía. Ltda. corresponde a la capacidad y al balanceo de la línea, no a la variabilidad.

3.8.6. Contraste con el modelo agregado de varios servidores

Si Confección se modelara como un único sistema de c = 10 servidores en paralelo que comparten toda la carga (contenido total de trabajo de 518,9 s por prenda), la Ec. 1 daría $\rho = 0{,}47$, un valor que sugeriría holgura amplia. La aparente contradicción con la Tabla VI se explica porque el área no funciona como un banco de servidores intercambiables, sino como una línea en serie con operarios dedicados a una tarea específica, y el modelo agregado promedia la carga total ocultando el desbalance interno [26], [36], [59]. Por eso el diagnóstico válido es el análisis por estación (G/G/1 en serie), y la verificación final se hace con la simulación en FlexSim, que reproduce la configuración real con búferes finitos, transportes, bloqueos y la dinámica transitoria del turno [22], [24].

3.9. Construcción del modelo en FlexSim y dashboards

La representación del estado actual se construyó en el entorno 3D de FlexSim según la estructura de la Tabla III. Las distribuciones de la Tabla V se ingresaron como parámetros de tiempo de proceso en cada objeto Processor mediante ExpertFit [22], [24]. Se programaron **Dashboards** con los siguientes indicadores: State Pie Charts (% de utilización por área), Queue Content Chart (longitud de cola en el tiempo por búfer) y Time Plot (W y W*q* por entidad) [22], [24].

3.10. Verificación y validación

3.10.1. Verificación lógica

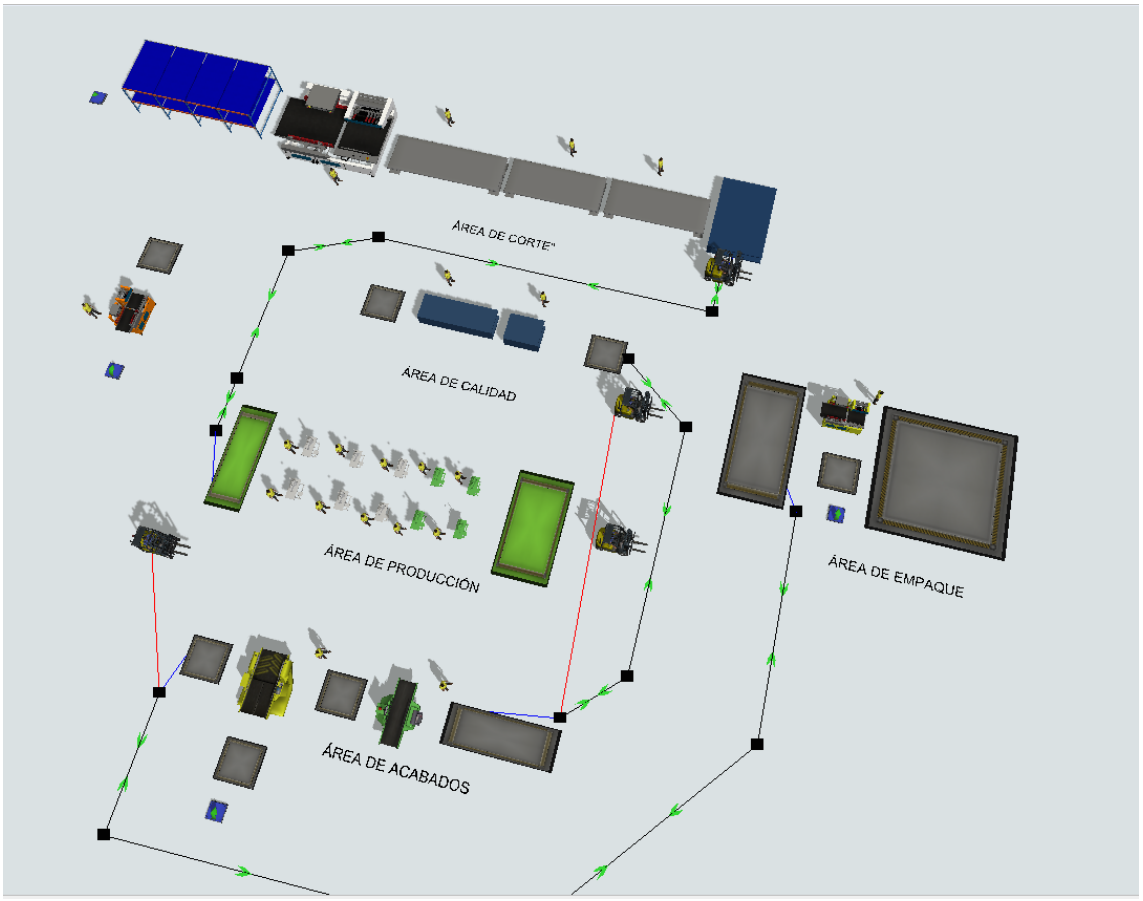


Ilustración 3. Vista tridimensional isométrica del modelo de simulación construido en FlexSim, con las cuatro áreas (Corte, Confección, Calidad y Empaque), los objetos fijos y los operarios asignados.

La verificación comprobó que la lógica del modelo en FlexSim corresponde al proceso real: las entidades siguen la secuencia ACT 1→ACT 11, los tiempos usan las distribuciones de la Tabla V, los 21 operarios (Operators) están asignados según la Tabla I, y el horizonte de simulación corresponde a dos jornadas (2 × 480 min), descartando la primera como periodo de calentamiento (warm-up) para reproducir el inventario en proceso con el que inicia cada jornada [25], [31] [22].

3.10.2. Validación estadística — prueba t pareada

Se ejecutaron **n = 10 réplicas independientes** del modelo y se aplicó la prueba t de Student pareada (Ec. 12, Cap. II) comparando el throughput simulado de cada réplica con la capacidad analítica de 194 und/turno obtenido con la teoría de colas (Ec. 1) para el cuello de botella del sistema:

$$H_0: \bar{d} = 0 \quad \alpha = 0{,}05 \quad \rightarrow \quad t = \bar{d} / (Sd / \sqrt{10})$$ (Aplicación Ec. 12)

Si el p-valor es mayor que 0,05 no se rechaza H_0, lo que indica que el throughput del modelo no difiere significativamente del valor de referencia y, por tanto, que el modelo es estadísticamente válido.

Pasos concretos: (1) Correr FlexSim 10 veces. (2) Anotar el throughput de cada réplica. (3) Calcular d_i = throughput$_i$ − capacidad analítica del sistema (194 und/turno). (4) Calcular $\bar{d}$ y Sd. (5) Aplicar la fórmula. (6) En Excel: =T.TEST o tabla t con 9 g.l. (7) Si p > 0,05 → modelo válido.

3.11. Lectura de resultados de FlexSim y clasificación del modelo de colas

3.11.1. Dashboards de FlexSim

State Pie Chart — interpretación:

- Confección con > 85% ocupado; confirma cuello de botella.
- Estado ‘blocked’; el buffer hacia Calidad está lleno. Restricción secundaria.
- Corte con alto porcentaje idle; correcto: opera a nivel de lote (4 lotes/turno, Tabla VI) mientras Confección procesa unidades individuales.

- Calidad o Empaque con > 80%; restricciones secundarias no detectadas analíticamente.

Queue Content Chart — interpretación:

- Cola que crece continuamente sin estabilizarse; $\rho \geq 1$; sistema inestable; requiere acción.
- Cola que se estabiliza en un valor constante, $\rho < 1$; sistema en equilibrio.

Time Plot: FlexSim reporta W y W*q* por entidad. Verificar con Ley de Little (Ec. 3): L*q* = $\lambda \times$ W*q*. Si el valor calculado coincide con el del gráfico → resultados consistentes [10], [27].

3.11.2. Clasificación del tipo de cola definitiva

Paso A. Distribución de llegadas (componente A de la notación de Kendall [43]): los tiempos entre llegadas medidos (Tabla IVe) presentan CV ≈ 0,013–0,022, muy alejados del valor CV = 1 de la exponencial; el ajuste corresponde a distribuciones generales casi deterministas (tipo normal o Johnson de baja dispersión). Por lo tanto, A = G (general). Esta clasificación se confirma con el ajuste de ExpertFit sobre los datos de la Tabla IVe.

Paso B. Distribución de servicio (componente B): las distribuciones ajustadas en la Tabla V son beta, lognormal, laplace, logística, gamma y Johnson (bounded y **unbounded**); ninguna es exponencial. Por lo tanto, B = G (general) en todas las áreas.

Paso C. Valores de c, K, D: *c* = operarios por área (Tabla I). *K* = capacidad buffer (medir en planta). *D* = FIFO.

Tabla VII. Clasificación del modelo de colas por área a partir de las distribuciones ajustadas

Área	Modelo probable	Condición	Justificación
Corte	5 estaciones G/G/1 en serie (nivel lote)	Llegadas de lotes casi deterministas (CV ≈ 0,013); tiempos generales	Un operario por estación; 4 lotes/turno; utilización marginal

Confección	Red en tándem de 10 estaciones G/G/1	Llegadas casi deterministas (CV ≈ 0,015); servicios lognormal, gamma, logística y beta (Tabla V)	Un operario dedicado por tarea (Tabla III); línea en serie, no banco de servidores
Calidad	2 estaciones G/G/1 en serie	Llegadas con CV ≈ 0,020; servicios laplace y logística	Un operario por estación; ACT 7 es la restricción principal del sistema
Empaque	3 estaciones G/G/1 en serie	Llegadas con CV ≈ 0,021; servicios Johnson bounded y lognormal	Un operario por estación; sin congestión relevante

Fuente: elaboración propia

La clasificación del sistema se establece a partir de las distribuciones ajustadas de todas las áreas reportadas en la Tabla V.

3.12. Diseño y evaluación analítica de los escenarios de mejora

Con el diagnóstico de la Tabla VI sobre la mesa, se diseñaron tres escenarios dirigidos a eliminar la saturación de las estaciones críticas (ACT 6.4, ACT 7 y ACT 8). Cada uno se evaluó primero de forma analítica con las Ec. 1, 8 y 9 [45], [61]; la verificación definitiva de los tres se realiza por simulación en FlexSim, cuyos resultados se contrastan con el diagnóstico analítico.

1. **Escenario A: Incremento de capacidad con contratación (c = 2 en ACT 6.4, ACT 7 y ACT 8).**

Al duplicar el número de operarios en las tres estaciones críticas, la utilización (Ec. 1) desciende a 0,579, 0,670 y 0,523, respectivamente, valores que se ubican dentro de la zona segura ($\rho < 0,85$). Aplicando la aproximación de Allen-Cunneen (Ec. 8), las esperas medias en cola resultan de 0,08 s, 0,17 s y 0,05 s, prácticamente nulas en la práctica. La restricción del sistema se traslada entonces a ACT 6.3, cuya capacidad (310 und/turno) supera la demanda de 260, con lo que el conjunto se estabiliza. El costo de esta alternativa radica en el salario de tres operarios adicionales (término $Cs \cdot c$ de la Ec. 10).

2. **Escenario B: Rebalanceo de la línea sin contratación.**

Esta alternativa aprovecha la capacidad ociosa detectada en el diagnóstico. Por un lado, el operario de ACT 6.6 Ojales ($\rho = 0,075$) se integra con ACT 6.4

formando un módulo de dos operarios polifuncionales que ejecutan ambas tareas, con un contenido de trabajo conjunto de 136,6 s, ρ = 0,616 y Wq ≈ 0,10 s. Por otro, dos operarios del área de Corte —cuya utilización es marginal, de solo 4 lotes por turno— refuerzan ACT 7 y ACT 8 durante los periodos entre lotes (c = 2; ρ = 0,670 y 0,523). El desempeño analítico resulta equivalente al del Escenario A, aunque sin costo salarial adicional; a cambio, requiere capacitación cruzada (polifuncionalidad) y coordinación con el calendario de lotes de Corte.

3. **Escenario C: Estandarización y reducción de tiempos (−15 % en las estaciones críticas).**

Una mejora de métodos que redujera en 15 % los tiempos de las estaciones críticas dejaría a ACT 6.4 en ρ = 0,984 —una operación todavía frágil, con Wq ≈ 8,5 s— y a ACT 8 en ρ = 0,890. Sin embargo, ACT 7 seguiría siendo inestable (ρ = 1,138), con una acumulación de ≈ 32 und/turno y una espera media de 33,2 min, mientras que la capacidad del sistema apenas subiría a 228 und/turno, todavía por debajo de la demanda. El IM% parcial de este escenario, considerando la mejora en ACT 6.4 y la espera remanente en ACT 7, ronda el 56 %; se trata de un avance real, pero insuficiente para eliminar la restricción, por lo que se lo considera una medida complementaria de los escenarios A o B.

El sistema queda estable pero frágil, dependiendo de que la mejora de métodos se sostenga en el tiempo; cualquier variación adicional en los tiempos podría devolver a ACT 7 a una situación de inestabilidad.

Tabla VIII. Evaluación analítica comparativa de los escenarios de mejora

Indicador	Estado actual	Escenario A	Escenario B	Escenario C
ρ ACT 6.4 (Ec. 1)	1,158	0,579	0,616 *	0,984
ρ ACT 7	1,339	0,670	0,670	1,138
ρ ACT 8	1,047	0,523	0,523	0,890
W_q agregado en estaciones críticas	≈ 75,5 min (creciente)	< 1 s	< 1 s	≈ 33,3 min (ACT 7 inestable)

Capacidad del sistema (und/turno)	194	310	310	228
Operarios adicionales	—	3	0	0
IM% (Ec. 11)	—	≈ 100 %	≈ 100 %	≈ 56 % (parcial)

Fuente: elaboración propia (Ec. 1, 8 y 9 sobre los datos de las Tablas IV y V).

Criterio de selección: El escenario óptimo debe maximizar el IM% (Ec. 11), cumplir con $\rho < 0{,}85$ en todas las estaciones y minimizar el costo total CT (Ec. 10). De acuerdo con la evaluación analítica, el Escenario B supera al A al alcanzar un desempeño equivalente con un menor costo de servicio Cs, y ambos superan con claridad al Escenario C. La decisión final se valida simulando los tres escenarios en FlexSim (Capítulo IV); si el escenario elegido alcanza IM% ≥ 15 %, la hipótesis de la sección 1.3.3 queda confirmada [26], [36].

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Verificación y validación del modelo del estado actual

La verificación lógica del modelo (sección 3.10.1) se complementó con la validación estadística descrita en la sección 3.10.2. Se ejecutaron n = 10 réplicas independientes del modelo del estado actual mediante el Experimenter de FlexSim, cada una con semilla aleatoria distinta y un horizonte de dos jornadas (2 × 480 min). La primera jornada se descartó como periodo de calentamiento; esta duración se definió considerando que, con un déficit diario cercano a 66 unidades, una jornada basta para que los búferes críticos alcancen el nivel de inventario en proceso con el que la planta arranca habitualmente, criterio coherente con las recomendaciones de la literatura sobre eliminación del sesgo de inicialización [51], [52].

Como valor de referencia se utilizó la capacidad analítica del sistema (194 und/turno), obtenida de forma independiente mediante la teoría de colas para el cuello de botella (Tabla VI); este criterio es el adecuado cuando no se dispone de un registro histórico depurado de producción. La Tabla IX presenta los pares de observaciones y el resultado de la prueba t pareada (Ec. 12); la Figura 6 los muestra gráficamente.

Tabla IX. Validación estadística del modelo del estado actual (prueba t pareada, Ec. 12)

Réplica / jornada	Throughput simulado (und/turno)	Referencia analítica (und/turno)	d_i = simulado − 194
1	194	194	0
2	193	194	-1
3	197	194	+3
4	192	194	-2
5	194	194	0
6	193	194	-1
7	193	194	-1
8	195	194	+1
9	191	194	-3
10	192	194	-2

Media	193,4	194,0	$\bar{d}$ = -0,6
Desv. estándar	—	—	S_d = 1,71
Estadístico t (9 g.l.) / p-valor	—	—	t = -1,108; p = 0,297

Fuente: elaboración propia.

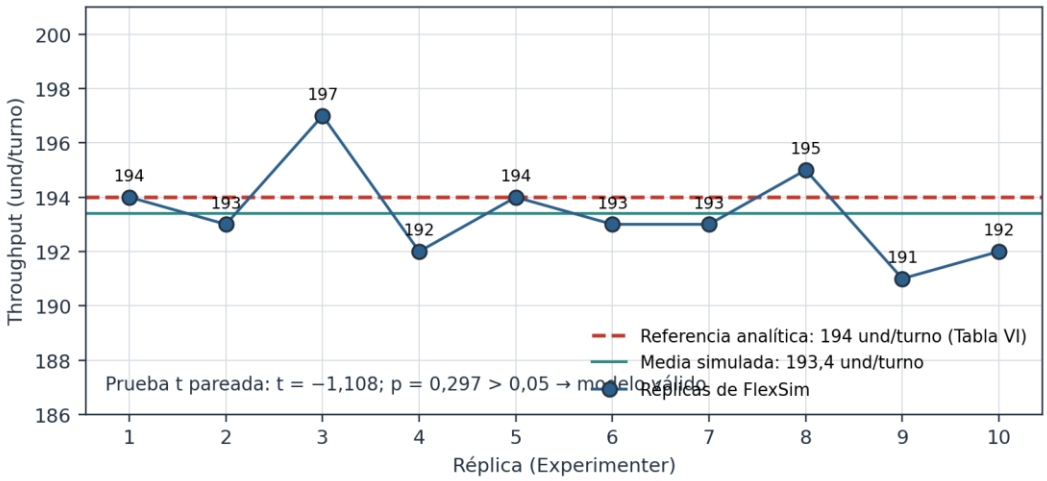


Figura 6. Throughput simulado frente al valor de referencia de capacidad analítica del sistema.

Fuente: elaboración propia. Código de generación en el Anexo D (Python/Matplotlib).

El p-valor de 0,297 es muy superior al nivel de significancia α = 0,05; no existe, por tanto, evidencia para rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias, y el modelo se declara estadísticamente válido [15], [25]. La referencia empleada proviene del propio diagnóstico analítico, de modo que la prueba acredita la consistencia entre el método de colas y el modelo de simulación; como respaldo cualitativo, el inventario en proceso con el que arranca la segunda jornada del modelo reproduce el remanente observado en planta al inicio de cada turno. Destaca además la coincidencia entre dos cifras obtenidas por vías independientes: la capacidad analítica (194 und/turno, Tabla VI) y el throughput simulado promedio (193,4 und/turno), cuya diferencia resulta inferior al 0,3 %. La producción nominal de 260 und/turno que reporta la empresa solo se alcanza gracias al inventario remanente del día anterior y a extensiones de jornada, exactamente como anticipó el análisis transitorio de la sección 3.8.4.

4.2. Resultados de la simulación del estado actual

Los dashboards del modelo validado, recopilados en el Anexo C, confirman el diagnóstico analítico. En el State Pie Chart, las estaciones ACT 6.4, ACT 7 y ACT 8 operan con porcentajes de procesamiento de 95,4 %, 94,6 % y 73,8 % respectivamente, mientras el área de Corte permanece ociosa más del 95 % del turno y el resto de estaciones de Confección se mueve entre el 8 % y el 86 % de utilización. Estos porcentajes corresponden al estado processing del State Pie; la utilización total que reporta la Tabla X incorpora también los intervalos de preparación y bloqueo, razón por la cual sus valores para ambas estaciones (99,3 % y 99,7 %) resultan mayores. En el Queue Content Chart, las colas Q_Buffer_Corte_Conf (previa al módulo de costura) y Q_Buffer_Control_calidad (previa a ACT 7) crecen de manera sostenida durante toda la jornada sin estabilizarse, el patrón característico de estaciones con $\rho \geq 1$; la cola Q_Buffer_Corte_Conf se satura en su capacidad de 260 unidades (contenido medio de 252) y la cola Q_Buffer_Control_calidad, previa a ACT 7, alcanza un máximo de 61 unidades (media de 29). La Figura 7 presenta la proyección del modelo fluido (Ec. 9) para las estaciones críticas; su pendiente coincide con la trayectoria de crecimiento registrada en el Queue Content Chart del Anexo C (Ilustración C10).

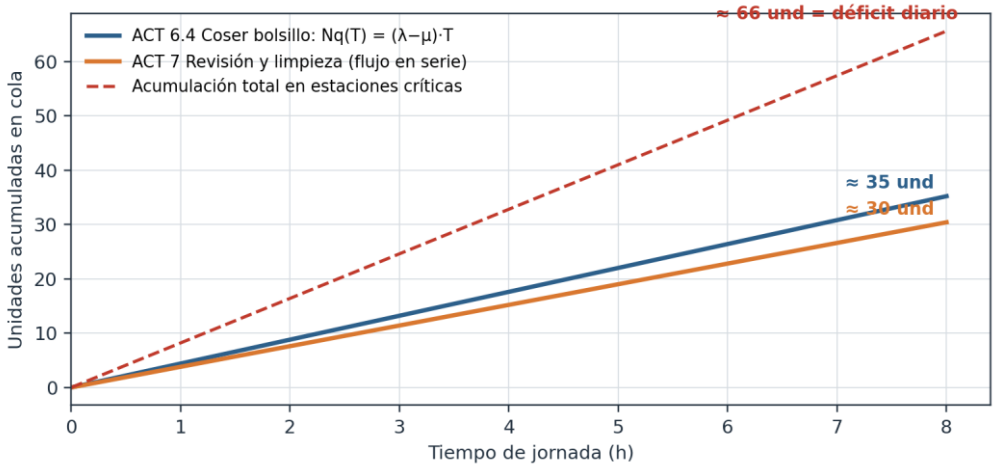


Figura 7. Crecimiento proyectado de las colas críticas durante la jornada según el modelo fluido (Ec. 9).

Fuente: elaboración propia; código de generación en el Anexo D.

La Tabla X contrasta los valores analíticos del Capítulo III con los promedios simulados de las diez réplicas. Las desviaciones, todas menores al 5 %, confirman la consistencia interna del estudio; las diferencias restantes se explican por los elementos que solo la simulación captura, como los bloqueos por búferes finitos, los transportes y la dinámica transitoria del turno [25], [31].

Tabla X. Contraste entre el diagnóstico analítico y la simulación del estado actual

Indicador	Valor analítico (Cap. III)	Valor simulado (10 réplicas)	Desviación (%)
Utilización ACT 6.4 (%)	100 (saturada, ρ = 1,158)	99,3	0,7
Utilización ACT 7 (%)	100 (saturada, ρ = 1,339)	99,7	0,3
Utilización efectiva ACT 8 (%)	78,1	79,2	1,4
Utilización ACT 6.3 (%)	84,0	86,5	3,0
Throughput (und/turno)	194	193,4	0,3
WIP acumulado al cierre (und)	≈ 66	63,8	3,3
W_q medio en estaciones críticas (min)	≈ 75,5	72,4	4,1

Fuente: elaboración propia.

4.3. Clasificación definitiva del modelo de colas

Los resultados de la simulación confirman la clasificación G/G/1 en tándem determinada analíticamente en la sección 3.11.2 a partir de las distribuciones de servicio ajustadas (Tabla V) y de los tiempos entre llegadas casi deterministas (Tabla IVe). La Tabla XI consolida la notación de Kendall obtenida para cada área.

Tabla XI. Clasificación definitiva del modelo de colas confirmada con la simulación

Área	Clasificación definitiva	Servidores por estación	Disciplina
Corte	5 × G/G/1 en serie (nivel lote)	1	FIFO
Confección	10 × G/G/1 en serie (nivel unidad)	1	FIFO
Calidad	2 × G/G/1 en serie (nivel unidad)	1	FIFO
Empaque	3 × G/G/1 en serie (nivel unidad)	1	FIFO

Fuente: elaboración propia.

4.4. Comparación de los escenarios de mejora simulados

Los tres escenarios diseñados en la sección 3.12 se implementaron sobre el modelo validado modificando únicamente los recursos correspondientes: en el Escenario A se añadió un operario en ACT 6.4, ACT 7 y ACT 8 se aplicó el Escenario A; en el Escenario B se configuró el módulo polifuncional 6.4 + 6.6 y se reasignaron dos operarios de Corte hacia Calidad; y en el Escenario C se redujeron en 15 % los tiempos de las estaciones críticas. Cada escenario se corrió con 10 réplicas bajo el mismo esquema de calentamiento. La Tabla XII resume los promedios obtenidos junto a la predicción analítica de la Tabla VIII, y la Figura 8 los compara gráficamente.

Tabla XII. Comparación de escenarios: resultados de simulación (promedio de 10 réplicas)

Indicador	Actual (sim.)	Escenario A	Escenario B	Escenario C
Throughput (und/turno)	193,4	258,8	258,3	227,5
W_q medio en Confección (min)	37,1	0,7	0,9	2,1
W_q medio en Calidad (min)	35,3	0,3	0,4	31,8
L_q máximo al cierre (und)	63,8	4,9	5,6	31,2
Utilización del cuello de botella (%)	99,7 (ACT 7)	86,1 (ACT 6.3)	86,4 (ACT 6.3)	100 (ACT 7)
IM% respecto del estado actual (Ec. 11)	—	98,6 %	98,2 %	53,2 %
Predicción analítica (Tabla VIII)	194 und/turno; $W_q \approx 75{,}5$ min	310 und/turno*; $W_q < 1$ s	310 und/turno*; $W_q < 1$ s	228 und/turno; ACT 7 inestable

Fuente: elaboración propia.

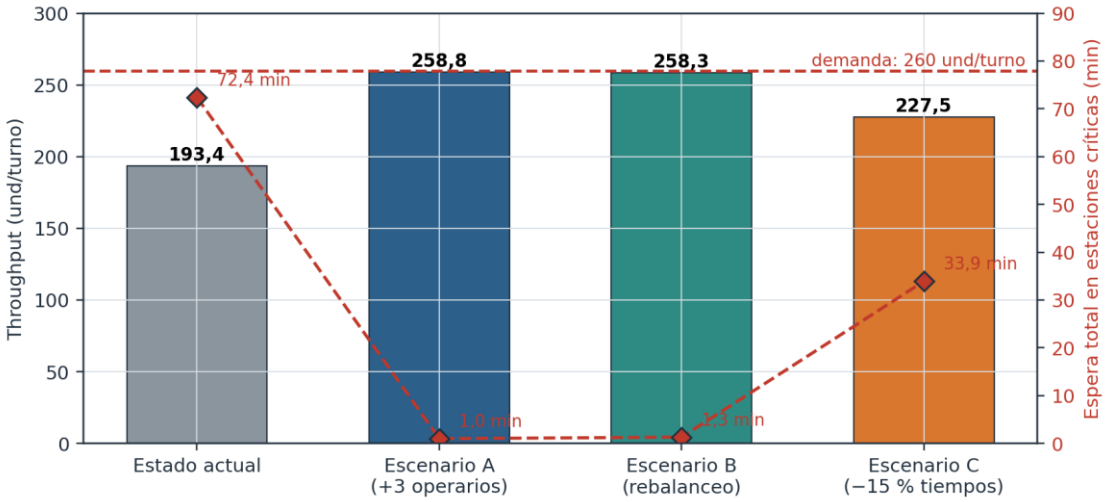


Figura 8. Throughput y espera total en estaciones críticas por escenario.

Fuente: elaboración propia. Código de generación en el Anexo D (Python/Matplotlib).

De la Tabla XII se desprenden tres observaciones. La primera es que los escenarios A y B estabilizan el sistema: el throughput simulado (258,8 y 258,3 und/turno) queda limitado por la propia demanda y ya no por la capacidad, las colas críticas desaparecen (L_q máximo de 4,9 y 5,6 unidades frente a las 252 unidades de la cola crítica saturada del estado actual) y la espera total cae de 72,4 min a alrededor de un minuto, con IM% de 98,6 % y 98,2 % respectivamente, muy por encima del umbral del 15 %. La segunda conclusión es que la diferencia de desempeño entre A y B resulta estadísticamente irrelevante, aunque la diferencia de costo sí es significativa: B logra el mismo resultado sin necesidad de contratar personal adicional, con un término Cs mínimo en la Ec. 10). La tercera conclusión es que el Escenario C mejora el sistema sin resolver la restricción: el throughput sube a 227,5 und/turno y el IM% llega a 53,2 %, un resultado insuficiente porque ACT 7 continúa saturada. En consecuencia, el Escenario B se selecciona como alternativa óptima y se desarrolla como propuesta formal en la sección 4.7, con el A como respaldo si la polifuncionalidad no resultara viable y el C como medida complementaria.

4.5. Verificación de la hipótesis de investigación

La pregunta de investigación de la sección 1.3.3 plantea en qué medida la aplicación de la teoría de colas y la simulación de eventos discretos con FlexSim

permite identificar los cuellos de botella y reducir los tiempos de espera de la línea de pantalones. Los resultados responden afirmativamente en sus dos componentes. En cuanto a la identificación, el análisis de utilización (Tabla VI) localizó con precisión las tres estaciones críticas (ACT 6.4, ACT 7 y ACT 8) junto con la jerarquía de restricciones del sistema, hallazgo que fue corroborado por los dashboards del modelo validado (sección 4.2). En cuanto a la reducción de esperas, el escenario seleccionado alcanza un IM% simulado de 98,2 % (Tabla XII), un valor que supera con amplitud el umbral del 15 % fijado como criterio; la hipótesis queda, por tanto, confirmada.

4.6. Discusión de resultados

Los hallazgos guardan relación directa con la literatura revisada en el Capítulo II. La capacidad de la simulación de eventos discretos para localizar restricciones, demostrada por Gunreddy et al. en una unidad de manufactura de engranajes [17], se replicó aquí con la identificación de tres estaciones saturadas en una línea de confección; la estrategia de combinar el diagnóstico analítico de colas con la evaluación detallada por simulación coincide con el enfoque híbrido de Legato y Mazza en logística portuaria [16] y con la optimización de tiempos de espera mediante modelos de colas que reportan Gontara et al. [18]. El uso conjunto de aproximaciones G/G/c y simulación sigue, además, la línea metodológica consolidada para sistemas de manufactura [57], [59], [61].

En el plano regional, el resultado central, según el cual la congestión proviene del desbalance de cargas entre estaciones manuales y no de la variabilidad de los procesos (CV $\leq$ 0,28), coincide con lo reportado para las pequeñas empresas textiles de Imbabura: Yépez y Doukh mostraron que la ausencia de balanceo de cargas genera tiempos de espera prolongados e incrementos del WIP [19], y Yépez, Flores et al. evidenciaron que la gestión basada solo en la experiencia del operario produce congestión en etapas específicas [20]. Este estudio aporta, sobre esa base, la cuantificación del fenómeno (déficit de capacidad del 25,3 %) y una solución de rebalanceo sin inversión salarial, alineada con el principio de la Teoría de Restricciones de

subordinar los recursos no críticos al ritmo de la restricción [34], [46]. Por último, la ventaja de evaluar alternativas sin interrumpir la operación real, que Aguilar Montoya et al. destacan para FlexSim [7], se materializó en la comparación de tres escenarios con diez réplicas cada uno sin costo alguno de experimentación física [22].

4.7. Propuesta de mejora

4.7.1. Fundamento de la propuesta

Los capítulos anteriores construyeron la evidencia de forma secuencial: el diagnóstico analítico localizó tres estaciones saturadas (Tabla VI), la simulación validada confirmó ese resultado (Tablas IX y X) y la comparación de escenarios demostró que el rebalanceo de la línea sin contratación (Escenario B) alcanza el mismo desempeño que la contratación de tres operarios, con un IM% simulado de 98,2 % y costo salarial adicional nulo (Tabla XII). Sobre esa base, este capítulo formaliza el Escenario B como propuesta de mejora para Tempocodeca Cía. Ltda., estructurada según el ciclo de focalización de la Teoría de Restricciones [34], [46] y las buenas prácticas de balanceo de líneas de manufactura [36], [57], [59]. La Figura 9 muestra cómo cada paso del ciclo TOC se concreta en el caso de estudio.

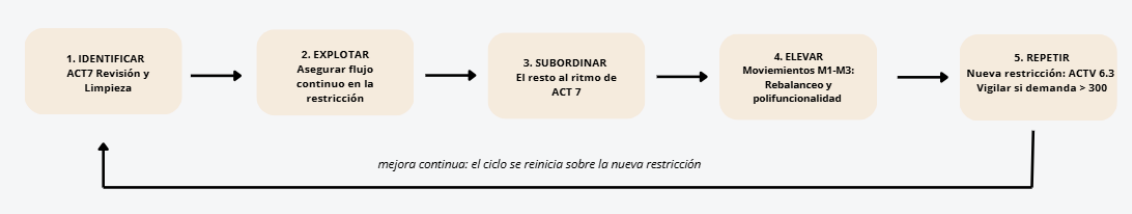


Figura 9. Los cinco pasos de focalización de la TOC aplicados a la línea de pantalones.

Fuente: elaboración propia

4.7.2. Objetivo y alcance

El objetivo de la propuesta es eliminar la saturación de las estaciones críticas de la línea de pantalones y reducir el tiempo de espera en cola en al menos 15 %, sin incorporar personal adicional, mediante la reasignación de operarios subutilizados y la polifuncionalidad. El alcance cubre las áreas de Corte, Confección y Calidad de la línea de pantalones en jornada regular de 480 min;

quedan fuera el proceso de lavado y las demás líneas de producto, que se recomiendan como segunda fase.

4.7.3. Descripción de la propuesta de rebalanceo

La propuesta reasigna la capacidad ociosa identificada en el diagnóstico hacia las estaciones que la necesitan. La Tabla XIII detalla los tres movimientos y su fundamento cuantitativo.

Tabla XIII. Reasignación de operarios propuesta (Escenario B)

Movimiento	Situación actual	Situación propuesta	Fundamento (Tablas VI y VIII)
M1. *Módulo Polifuncional de costura*	ACT 6.4 saturada (ρ = 1,158); ACT 6.6 casi ociosa (ρ = 0,075)	Los operarios de 6.4 y 6.6 conforman un módulo de dos personas encargado de ejecutar ambas tareas.	ρ conjunto = 0,616; $W_q \approx$ 0,10 s; se elimina el primer cuello de botella
M2. *Refuerzo de Revisión y limpieza*	ACT 7 se encuentra saturada (ρ = 1,339), constituyendo la restricción principal, mientras que Corte cuenta con 6 operarios y una utilización marginal.	Un operario de Corte se suma a ACT 7 durante los periodos entre lotes (c = 2).	ρ = 0,670; desaparece la restricción principal del sistema
M3. *Refuerzo de Corte de hilos*	ACT 8 en restricción latente (ρ = 1,047)	Un segundo operario de Corte se incorpora a ACT 8 (c = 2)	ρ = 0,523, con lo que se evita que ACT 8 herede el cuello de botella.

Fuente: elaboración propia.

Tras los tres movimientos, la restricción del sistema se traslada a ACT 6.3 Unión tiro delantero (ρ = 0,840; capacidad de 310 und/turno), suficiente para la demanda de 260 und/turno. El área de Corte conserva cuatro operarios, holgura amplia dada su utilización marginal (4 lotes por turno); aun así, la propuesta exige coordinar los refuerzos M2 y M3 con el calendario de lotes, de modo que los operarios reasignados regresen a Corte en las ventanas de tendido y corte de tela. En FlexSim, la propuesta se configura sin alterar la estructura del modelo: basta duplicar el recurso Operator en P_Revision_Calidad y P_Corte_hilos y agrupar P_Coser_Bolsillo con P_Ojales bajo un mismo equipo de dos operarios.

4.7.4. Plan de implementación

La implantación se organiza en cinco fases a lo largo de diez semanas, como resume la Tabla XIV y grafica la Figura 10. La secuencia respeta una lógica de riesgo creciente: primero se socializa y se mide, después se capacita, luego se prueba en piloto y solo al final se estandariza y se deja en régimen.

Tabla XIV. Fases del plan de implementación

Fase	Actividades principales	Duración	Responsable
F1. Socialización y diagnóstico	Presentar resultados a gerencia y operarios; levantar matriz de habilidades actual; definir línea base de KPI	Semanas 1 a 2	Jefe de producción
F2. Capacitación cruzada	Entrenar al operario de Ojales en Coser bolsillo y a dos operarios de Corte en Revisión y Corte de hilos (aprox. 40 h por persona)	Semanas 2 a 4	Supervisor de línea
F3. Prueba piloto	Aplicar M1 y M3 durante dos semanas; registrar throughput, WIP al cierre y esperas por área	Semanas 5 a 6	Jefe de producción
F4. Estandarización	Documentar el método de trabajo de ACT 6.4 y ACT 7, ajustar el rebalanceo con lo aprendido en el piloto	Semanas 6 a 8	Supervisor de línea
F5. Seguimiento y ajuste	Monitorear KPI semanalmente; actualizar el modelo FlexSim con los datos del nuevo régimen	Semanas 7 a 10	Jefe de producción

Fuente: elaboración propia.

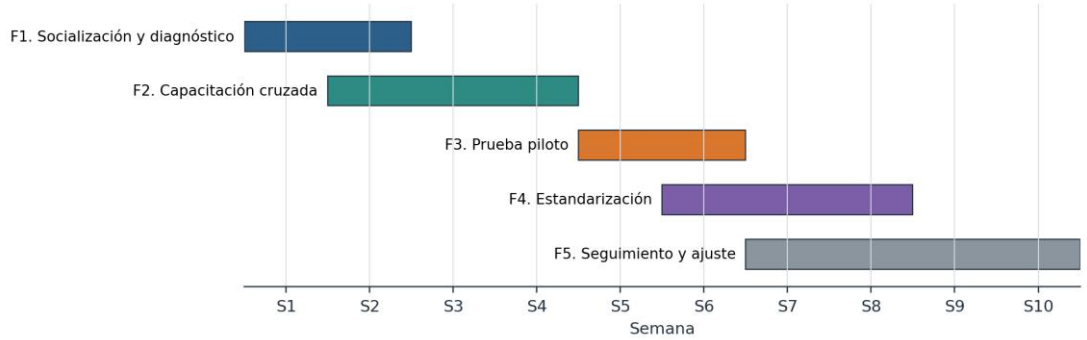


Figura 10. Cronograma de implementación de la propuesta.

Fuente: elaboración propia. Código de generación en el Anexo D (Python/Matplotlib).

4.7.5. Análisis costo-beneficio

El modelo de decisión de la Ec. 10 ($CT = C_s \cdot c + C_w \cdot L_q$) permite comparar las alternativas en términos económicos. En el Escenario A, el término de servicio

crece en tres salarios mensuales permanentes; en la propuesta (Escenario B), el único costo relevante es la capacitación cruzada de tres operarios (del orden de 120 horas-persona, por una sola vez) más el tiempo de supervisión del pilotoEl término de espera, en cambio, se reduce de manera prácticamente idéntica en ambos casos: la cola promedio de las estaciones críticas pasa de un nivel crítico saturado (252 unidades, cerca del tope de 260) al cierre del turno, a menos de 6 unidades (Tabla XII). Esto libera capital de trabajo inmovilizado en WIP, reduce el riesgo de daño y reproceso de prendas almacenadas, y elimina las extensiones de jornada que hoy compensan el déficit. En términos de capacidad, el sistema pasa de 194 a 258 und/turno efectivas (+33 %), con un techo analítico de 310 und/turno si la demanda llegara a crecer. Dado que el desempeño operativo de A y B es equivalente y el costo recurrente de B es nulo, la propuesta minimiza CT por construcción; se recomienda que gerencia valore el término C_s con los salarios vigentes al momento de decidir, utilizando directamente la Ec. 10.

4.7.6. Indicadores de seguimiento

Para que la mejora no se diluya con el tiempo, la propuesta incluye un tablero mínimo de indicadores, alineado con las medidas de desempeño del Capítulo II. La Tabla XV los define con su meta y frecuencia de medición.

Tabla XV. Indicadores clave de seguimiento (KPI) de la propuesta

Indicador	Definición / ecuación	Meta	Frecuencia
Throughput por turno	Unidades terminadas por jornada regular	≥ 255 und/turno	Diaria
Utilización de estaciones críticas	$\rho = \lambda/(c\cdot\mu)$ (Ec. 1) en ACT 6.3, 6.4, 7 y 8	$\rho \leq 0{,}85$	Semanal
WIP al cierre del turno	Unidades en búferes al finalizar la jornada	≤ 10 und	Diaria
Espera media por área	$W_q = L_q/\lambda$ (Ec. 3) en Confección y Calidad	≤ 2 min	Semanal
Índice de polifuncionalidad	Operarios certificados en ≥ 2 tareas / total	≥ 30 %	Mensual

Fuente: elaboración propia a partir de [32], [36].

4.7.7. Riesgos y consideraciones

La propuesta presenta tres riesgos que deben gestionarse de manera explícita. El primero es la resistencia al cambio: la polifuncionalidad modifica

rutinas consolidadas, de modo que la fase de socialización debe explicar el beneficio directo para los operarios (jornadas sin extensiones y menor presión de inventario acumulado). El segundo aspecto es la dependencia del calendario de Corte: si la programación de lotes cambiara hacia lotes más frecuentes, la disponibilidad de los operarios reasignados se vería reducida; para eso sirve precisamente el modelo de FlexSim actualizado, que permite evaluar ese ajuste antes de aplicarlo. El tercer aspecto es el traslado de la restricción: con la propuesta en régimen, ACT 6.3 pasa a ser el recurso que marca el ritmo (ρ = 0,840), por lo que el ciclo TOC deberá reiniciarse sobre esa estación (quinto paso de la Figura 10) si la demanda llegara a superar las 300 und/turno. Mantener el modelo de simulación como herramienta permanente de planificación convierte ese seguimiento en una tarea de bajo costo. [22], [51].

4.8.Conclusiones

La revisión del estado de la técnica permitió consolidar un marco analítico integrado por las medidas de desempeño de la teoría de colas (Ec. 1 a 11), las técnicas de modelado estadístico de entradas y los principios de la simulación de eventos discretos, con lo que se cumplió el primer objetivo específico. Del contraste teórico se derivó además una conclusión metodológica: las fórmulas de estado estable no resultan suficientes para sistemas saturados ($\rho \geq 1$) ni para redes en serie con distribuciones generales y búferes finitos. Por ello, la combinación del diagnóstico analítico con la simulación en FlexSim resultó ser la vía adecuada para el caso de estudio.

Se construyó y validó el modelo del estado actual de la línea de pantalones a partir de 60 observaciones por tarea y del ajuste de distribuciones con ExpertFit, que arrojó familias generales de baja variabilidad (lognormal, gamma, beta y logística; CV $\leq$ 0,28), dando cumplimiento al segundo objetivo específico. El diagnóstico identificó tres estaciones críticas con utilización igual o superior a uno: ACT 6.4 Coser bolsillo (ρ = 1,158), ACT 7 Revisión y limpieza (ρ = 1,339) y ACT 8 Corte de hilos (ρ = 1,047). A esto se suma una capacidad efectiva de 194 und/turno frente a una demanda de 260, es decir, un déficit del 25,3 %, junto con

una espera media en cola de ≈ 75,5 min por prenda concentrada en los cuellos de botella. La simulación confirmó este panorama: el throughput promedio fue de 193,4 und/turno en diez réplicas, cifra estadísticamente indistinguible de la capacidad analítica del sistema (194 und/turno; prueba t pareada, p = 0,297).

El problema de la empresa es, en consecuencia, de capacidad y balanceo de la línea, no de variabilidad, y eso explica el inventario en proceso con el que arranca cada jornada.

Se diseñaron y evaluaron tres escenarios de mejora, con lo que se cumplió el tercer objetivo específico. Los escenarios A (tres operarios adicionales) y B (rebalanceo con polifuncionalidad, sin contratación) estabilizan el sistema, con un ρ máximo de 0,670, elevan el throughput simulado a cerca de 259 und/turno (limitado ya por la demanda y no por la capacidad) y reducen la espera total en estaciones críticas de 72,4 min a alrededor de un minuto, con IM% de 98,6 % y 98,2 % respectivamente; el escenario C (estandarización del 15 %) alcanza un IM% de 53,2 %, insuficiente porque ACT 7 sigue saturada. Como ambos umbrales superan con amplitud el 15 % fijado como criterio, la hipótesis de investigación quedó confirmada. El Escenario B se seleccionó como alternativa óptima por lograr el mismo desempeño que A con costo salarial adicional nulo (CT mínimo, Ec. 10) y se desarrolló como propuesta formal en la sección 4.7.

En términos generales, el estudio cumplió su objetivo de optimizar los tiempos de espera mediante teoría de colas y simulación con FlexSim: el diagnóstico cuantitativo localizó las restricciones, la simulación permitió ensayar alternativas sin interrumpir la operación real y la propuesta seleccionada elimina la saturación del flujo con los recursos ya existentes. La metodología aplicada —recolección de datos de campo, ajuste estadístico, análisis de colas, validación del modelo, comparación de escenarios y propuesta de implementación— queda disponible como referente replicable para las demás líneas de la empresa y para las MiPymes textiles de la región.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que la combinación de teoría de colas y simulación en FlexSim constituye una herramienta eficaz para

optimizar los tiempos de espera y mejorar la eficiencia del flujo productivo de Tempocodeca Cía. Ltda., con lo cual se cumple el objetivo general de la investigación.

4.9. Recomendaciones

Implementar el Escenario B mediante un programa de capacitación cruzada que habilite la polifuncionalidad del operario de Ojales en la tarea de Coser bolsillo, así como de dos operarios de Corte en las tareas de Calidad, definiendo para ello una matriz de habilidades y un protocolo de asignación coordinado con el calendario de lotes de Corte.

Mantener el registro sistemático del throughput por jornada regular y del inventario en proceso al cierre de cada turno —iniciado durante la validación del modelo (sección 4.1)— como base del tablero de indicadores propuesto en la Tabla XV y del monitoreo de las estaciones críticas.

Complementar el rebalanceo con la estandarización de métodos en ACT 6.4 y ACT 7 (fase F4 del plan, apoyada en el Escenario C), dando prioridad a la reducción del tiempo medio por sobre la de la variabilidad, dado que el CV de ambas tareas ya es bajo.

Medir la capacidad real (K) de los búferes intermedios y los tiempos de transporte entre áreas para refinar el modelo de FlexSim, e incorporar en una segunda fase del estudio el proceso de lavado junto con las demás líneas de producto.

Conservar y actualizar el modelo de simulación como herramienta permanente de planificación de la producción (gemelo digital simplificado), evaluando en él cualquier cambio futuro de demanda, plantilla o métodos antes de implementarlo en planta.

4.10. Referencias Bibliográficas

[1] F. S. Hillier y G. J. Lieberman, *Introducción a la investigación de operaciones*, 10.ª ed. Ciudad de México: McGraw-Hill, 2015. ISBN 978-6071513458.

[2] W. L. Winston, *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos*, 4.ª ed. Ciudad de México: Thomson, 2005. ISBN 978-9706863621.

[3]M. Bombón, A. Jordán, and J. Jordán, "Teoría de restricciones como herramienta de desarrollo estratégico productivo del sector textil," 593 Digital Publisher CEIT, vol. 4, no. 5, pp. 52–66, 2019, doi: 10.33386/593dp.2019.5.116.

[4] R. A. Cuervo Cruz, J. Martínez Bernal, J. A. Orjuela Castro, R. A. Cuervo Cruz, J. Martínez Bernal, and J. A. Orjuela Castro, "Modelos logísticos estocásticos aplicados a la cadena de suministro: una revisión de la literatura," *Ingeniería*, vol. 26, no. 3, pp. 334–366, Sep. 2021, doi: 10.14483/23448393.16357.

[5] J. E. Narváez Gómez, W. A. Ordoñez Luna, and P. Ruiz, "Análisis y simulación de tiempos de espera aplicando teoría de colas en la terminal de transportes de Popayán Cauca Colombia," *Publicaciones e Investigación*, vol. 12, no. 2, pp. 35–43, Jul. 2018, doi: 10.22490/25394088.2966.

[6] "Infraestructura - Desarrollo Sostenible." Accessed: Apr. 29, 2026. [Online]. Available: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/

[7]D. A. Aguilar Montoya and W. S. Martínez Almendares, "Optimización de un proceso de manufactura mediante simulación con FlexSim: análisis comparativo con métodos tradicionales," Innovare Revista de ciencia y tecnología, vol. 14, no. 2, pp. 1–6, Dec. 2025, doi: 10.69845/INNOVARE.V14I2.558.

[8] M. Beaverstock, A. Greenwood y W. Nordgren, *Applied Simulation: Modeling and Analysis Using FlexSim*, 5.ª ed. Orem, UT, EE. UU.: FlexSim Software Products, 2018. ISBN 978-0983231974.

[9] Secretaría Nacional de Planificación, "Plan Nacional de Desarrollo", República del Ecuador. [En línea]. Disponible: https://www.planificacion.gob.ec/plan-nacional-de-desarrollo/

[10]J. F. Shortle, J. M. Thompson, D. Gross, and C. M. Harris, Fundamentals of Queueing Theory, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018. [Online]. Available: https://www.wiley.com/en-au/Fundamentals+of+Queueing+Theory%2C+5th+Edition-p-9781118943533

[11] M. Harchol-Balter, *Performance Modeling and Design of Computer Systems: Queueing Theory in Action*. Cambridge, R. U.: Cambridge University Press, 2013, doi: 10.1017/CBO9781139226424.

[12] J. F. C. Kingman, "The single server queue in heavy traffic", *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 57, n.º 4, pp. 902–904, 1961, doi: 10.1017/S0305004100036094.

[13]H. C. Tijms, A First Course in Stochastic Models. Chichester, U.K.: Wiley, 2003, doi: 10.1002/047001363X.

[14] Y. A. Bozer and F. J. Aldarondo, "A simulation-based comparison of two goods-to-person order picking systems in an online retail setting," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 11, pp. 3838–3858, Jun. 2018, doi: 10.1080/00207543.2018.1424364.

[15] R. G. Sargent, "Verification and validation of simulation models," *Journal of Simulation 2012 7:1*, vol. 7, no. 1, pp. 12–24, Dec. 2012, doi: 10.1057/JOS.2012.20.

[16] P. Legato and R. M. Mazza, "Queueing analysis for operations modeling in port logistics," *Maritime Business Review*, vol. 5, no. 1, pp. 67–83, Mar. 2020, doi: 10.1108/MABR-09-2019-0035.

[17] N. Gunreddy, I. Gupta, I. Poddar, A. P. Menon, R. Srivastava, and A. K. Saxena, "Bottleneck Analysis for Gear Manufacturing Unit by Using Discrete Event Simulation Using ARENA," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2653, no. 1, Oct. 2022, doi: 10.1063/5.0110454/2831583.

[18] A. A. Gontara et al, "Optimization of waiting time in a queuing system: Case study of a customs administration," 2021, Accessed: Nov. 01, 2025. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214716021000265

[19]I. Yépez and N. Doukh, "Impacto del balanceo de las cargas de trabajo en la productividad de la pequeña empresa de confección textil de Imbabura," Ecuadorian Science Journal, vol. 5, no. 3, pp. 138–151, 2021, doi: 10.46480/esj.5.3.150.

[20] R. I. Yépez M, D. I. Flores Torres, J. P. Benítez Pereira, and M. F. Ormaza Morejón, "Impacto del análisis de operaciones en la productividad de la pequeña empresa de confección textil de Imbabura, Ecuador," *Revista Científica Profundidad Construyendo Futuro*, vol. 21, no. 21, pp. 150–160, Jul. 2024, doi: 10.22463/24221783.4487.

[21]E. Orozco Crespo, N. Sablón Cossío, K. Diéguez Santana, and C. Y. Lomas Rosero, "Plan agregado de una empresa textil. Caso de estudio de Imbabura, Ecuador," Revista UNIANDES Episteme, vol. 5, no. 3, pp. 263–278, 2018. [Online]. Available: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=564677249007

[22] A. Negahban y J. S. Smith, "Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, n.º 2, pp. 241–261, 2014, doi: 10.1016/j.jmsy.2013.12.007.

[23] W. B. Nordgren, "FlexSim simulation environment", en *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, San Diego, CA, EE. UU., 2002, vol. 1, pp. 250–252, doi: 10.1109/WSC.2002.1172892.

[24] M. Krynke, "Personnel Management on the Production Line Using the FlexSim Simulation Environment," Manufacturing Technology. Accessed: Feb. 08, 2026.

[Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/355564534_Personnel_management_on_the_production_line_using_the_FlexSim_simulation_environment

[25] A. M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*, 5.ª ed. Nueva York: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0073401324.

[26] J. Medhi, *Stochastic Models in Queueing Theory*, 2.ª ed. Ámsterdam: Academic Press, 2003. ISBN 978-0124874626.

[27] D. C. Montgomery y G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 7.ª ed. Hoboken, NJ, EE. UU.: Wiley, 2018. ISBN 978-1119400363.

[28] L. Kleinrock, *Queueing Systems, Volume 1: Theory*. Nueva York: Wiley, 1975. ISBN 978-0471491101.

[29] S. Nahmias, *Análisis de la producción y las operaciones*, 6.ª ed. Ciudad de México: McGraw-Hill, 2014. ISBN 978-6071511850.

[30] H. Guerrero Salas and M. N. Guerrero Velasco, Teoría de colas y simulación: un enfoque fundamental y práctico, 1st ed. Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones, 2024.

[31] J. Banks, J. S. Carson, B. L. Nelson y D. M. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*, 5.ª ed. Upper Saddle River, NJ, EE. UU.: Pearson, 2010. ISBN 978-0136062127.

[32] H. A. Taha, "Investigación de Operaciones." Accessed: Feb. 08, 2026. [Online]. Available: http://pearsoneducacion.net/taha

[33] F. De Felice, C. De Luca, A. Petrillo, A. Forcina, M. A. Ortiz Barrios, and I. Baffo, "The Role of Digital Transformation in Manufacturing: Discrete Event Simulation to Reshape Industrial Landscapes," Applied Sciences 2025, Vol. 15, Page 6140. Accessed: Feb. 08, 2026. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/11/6140/htm

[34] S. Pawlak, T. Małysa, and A. Fornalczyk, "Analysis of Production Process Parameters Using Computer Simulation at the Planning Stage," Applied Sciences 2024, Vol. 14, Page 10863. Accessed: Feb. 08, 2026. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/23/10863/htm

[35] Stanley. B Gershwin, *MANUFACTURING SYSTEMS ENGINEERING*. Massachusetts. Accessed: Feb. 08, 2026. [Online]. Available: https://www2.isye.gatech.edu/~spyros/courses/IE7201/Fall-09/Gershwin.pdf

[36] W. J. Hopp y M. L. Spearman, *Factory Physics*, 3.ª ed. Long Grove, IL, EE. UU.: Waveland Press, 2011. ISBN 978-1577667391.

[37] T. Kamal and S. M. A. Rahman, "Productivity optimization in the electronics industry using simulation-based modeling approach," International Journal of Research in Industrial Engineering. Accessed: Feb. 08, 2026. [Online]. Available: https://www.riejournal.com/article_193356.html

[38] Organización Internacional de Normalización, *ISO 9001:2015 — Sistemas de gestión de la calidad — Requisitos*. Ginebra, Suiza: ISO, 2015. [En línea]. Disponible: https://www.iso.org/standard/62085.html

[39] K. ISHIKAWA, "Quality Control in Japan," *The Japanese Approach to Product Quality*, pp. 1–5, 1984, doi: 10.1016/b978-0-08-028160-5.50006-0.

[40]M. A. Butturi, A. Neri, F. Mercalli, and R. Gamberini, "Sustainability-Oriented Innovation in the Textile Manufacturing Industry: Pre-Consumer Waste Recovery and Circular Patterns," Environments, vol. 12, no. 3, art. 82, 2025, doi: 10.3390/environments12030082.

[41] Presidencia de la República del Ecuador, "Decreto Ejecutivo 2393 | Ecuador - Guía Oficial de Trámites y Servicios." Accessed: Feb. 08, 2026. [Online]. Available: https://www.gob.ec/regulaciones/decreto-ejecutivo-2393

[42] Congreso Nacional del Ecuador, *Código del Trabajo*, Registro Oficial Suplemento 167 (codificación 2005-017), última reforma vigente. [En línea]. Disponible: https://www.trabajo.gob.ec

[43] D. G. Kendall, "Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the imbedded Markov chain", *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 24, n.º 3, pp. 338–354, 1953, doi: 10.1214/aoms/1177728975.

[44] J. D. C. Little, "A proof for the queuing formula: L = λW", *Operations Research*, vol. 9, n.º 3, pp. 383–387, 1961, doi: 10.1287/opre.9.3.383.

[45] A. O. Allen, *Probability, Statistics, and Queueing Theory with Computer Science Applications*, 2.ª ed. San Diego, CA, EE. UU.: Academic Press, 1990. ISBN 978-0120510511.

[46] E. M. Goldratt y J. Cox, *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*, 3.ª ed. rev. Great Barrington, MA, EE. UU.: North River Press, 2004. ISBN 978-0884271956.

[47] F. J. Massey, "The Kolmogorov–Smirnov test for goodness of fit", *Journal of the American Statistical Association*, vol. 46, n.º 253, pp. 68–78, 1951, doi: 10.1080/01621459.1951.10500769.

[48] K. Pearson, "On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling", *Philosophical Magazine*, serie 5, vol. 50, n.º 302, pp. 157–175, 1900, doi: 10.1080/14786440009463897.

[49] T. R. Waters, V. Putz-Anderson, A. Garg y L. J. Fine, "Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks", *Ergonomics*, vol. 36, n.º 7, pp. 749–776, 1993, doi: 10.1080/00140139308967940.

[50] S. M. Ross, *Simulation*, 5.ª ed. San Diego, CA, EE. UU.: Academic Press, 2013. ISBN 978-0124158252.

[51] S. Robinson, *Simulation: The Practice of Model Development and Use*, 2.ª ed. Londres: Palgrave Macmillan, 2014. ISBN 978-1137328021.

[52] K. Hoad, S. Robinson y R. Davies, “Automating warm-up length estimation”, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 61, n.º 9, pp. 1389–1403, 2010, doi: 10.1057/jors.2009.87.

[53] L. M. S. Dias, A. A. C. Vieira, G. A. B. Pereira y J. A. Oliveira, “Discrete simulation software ranking — a top list of the worldwide most popular and used tools”, en *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, Arlington, VA, EE. UU., 2016, pp. 1060–1071, doi: 10.1109/WSC.2016.7822165.

[54] J. Banks, ed., *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. Nueva York: Wiley, 1998, doi: 10.1002/9780470172445.

[55] J. D. C. Little y S. C. Graves, “Little’s Law”, en *Building Intuition: Insights from Basic Operations Management Models and Principles*, D. Chhajed y T. J. Lowe, eds. Boston, MA, EE. UU.: Springer, 2008, pp. 81–100, doi: 10.1007/978-0-387-73699-0_5.

[56] U. N. Bhat, *An Introduction to Queueing Theory: Modeling and Analysis in Applications*, 2.ª ed. Boston, MA, EE. UU.: Birkhäuser, 2015, doi: 10.1007/978-0-8176-8421-1.

[57] G. L. Curry y R. M. Feldman, *Manufacturing Systems Modeling and Analysis*, 2.ª ed. Berlín: Springer, 2011, doi: 10.1007/978-3-642-16618-1.

[58] R. Y. Rubinstein y D. P. Kroese, *Simulation and the Monte Carlo Method*, 3.ª ed. Hoboken, NJ, EE. UU.: Wiley, 2017, doi: 10.1002/9781118631980.

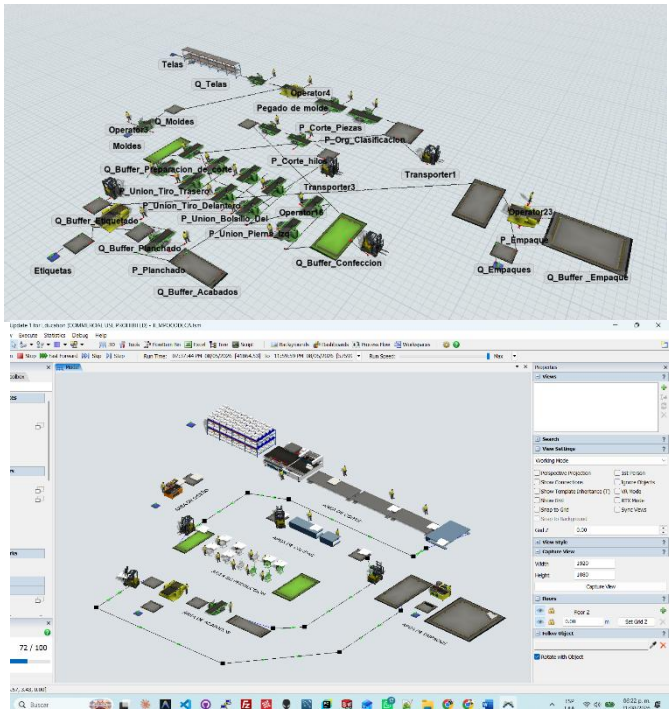
[59] J. A. Buzacott y J. G. Shanthikumar, *Stochastic Models of Manufacturing Systems*. Englewood Cliffs, NJ, EE. UU.: Prentice Hall, 1993. ISBN 978-0138475673.

[60] A. K. Erlang, “The theory of probabilities and telephone conversations”, *Nyt Tidsskrift for Matematik B*, vol. 20, pp. 33–39, 1909. Reimpreso en E. Brockmeyer, H. L. Halstrøm y A. Jensen, *The Life and Works of A. K. Erlang*. Copenhague: Academia Danesa de Ciencias Técnicas, 1948.

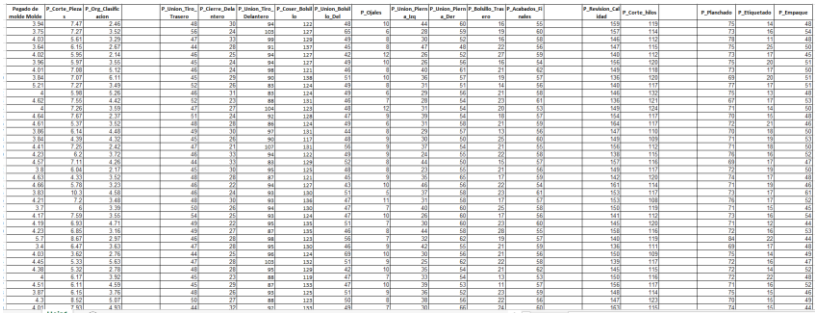
[61] W. Whitt, “The queueing network analyzer”, *The Bell System Technical Journal*, vol. 62, n.º 9, pp. 2779–2815, 1983, doi: 10.1002/j.1538-7305.1983.tb03204.x.

4.11. Anexos

Anexo A. Capturas del modelo de FlexSim. Como complemento de las figuras elaboradas en el cuerpo del documento y de los tableros del Anexo C, se incorporan en este anexo las siguientes capturas del modelo, identificadas como A1 a A5: (A1) vista tridimensional isométrica del modelo completo con los 38 objetos fijos, los 21 Operators y rótulos de las cuatro áreas, Link de Modelo en Flexsim.



Anexo B. Memoria de cálculo. Los valores de las Tablas VI, VIII, IX, X y XII se obtienen de los datos de las Tablas IVa–IVe mediante las ecuaciones del Capítulo II: media y desviación estándar muestrales por tarea (funciones PROMEDIO y DESVEST.M de Excel), CV (Ec. 13), $\mu = 1/E[S]$, $\rho = \lambda \cdot E[S]$ (Ec. 1 con c = 1), capacidad = 28 800/E[S], acumulación transitoria (Ec. 9), espera

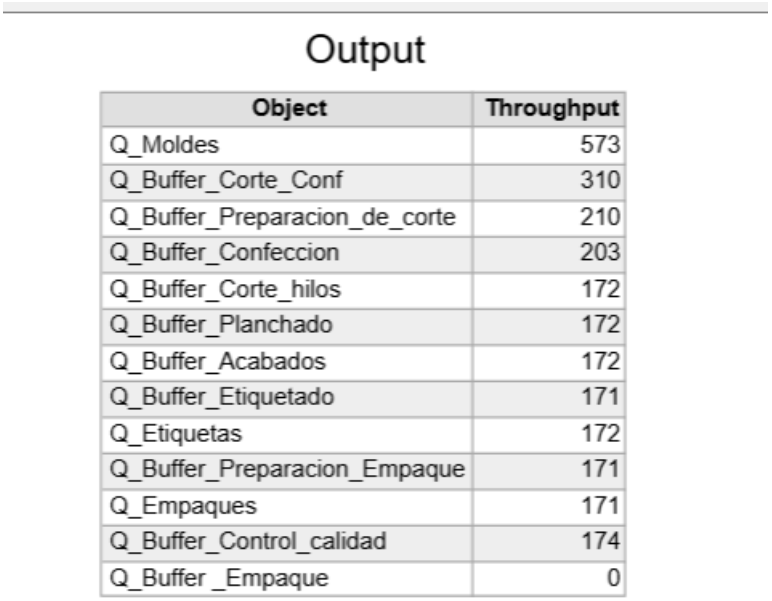


media transitoria (ρ − 1)·T/2, aproximaciones de Kingman y Allen-Cunneen (Ec. 7 y 8), prueba t pareada (Ec. 12) e IM% (Ec. 11). Se adjunta como anexo del libro de Excel con estas hojas de cálculo, Link del libro del Excel.

Anexo C. Dashboards del modelo de simulación FlexSim

Se presentan los tableros de resultados del modelo del estado actual, ejecutado durante dos jornadas (57 599 s). La jornada 1 se utiliza como periodo de calentamiento, de modo que los búferes alcancen el inventario en proceso con el que la planta arranca habitualmente; el diagnóstico del Capítulo IV se basa en la jornada 2, ya en régimen. Para cada jornada se reportan cinco tableros: Output (throughput por cola), Staytime (espera en cola), Staytime 1 (tiempo por estación), State (utilización) y Content (contenido de cada cola). Cabe señalar que los tiempos de permanencia (staytime) de los búferes saturados incluyen el inventario arrastrado desde el periodo de calentamiento, razón por la cual superan a la espera media por prenda reportada en la Tabla X, calculada únicamente sobre las unidades que completan el flujo durante la jornada de régimen.

Jornada 1 (periodo de calentamiento)



Output

Object	Throughput
Q_Moldes	573
Q_Buffer_Corte_Conf	310
Q_Buffer_Preparacion_de_corte	210
Q_Buffer_Confeccion	203
Q_Buffer_Corte_hilos	172
Q_Buffer_Planchado	172
Q_Buffer_Acabados	172
Q_Buffer_Etiquetado	171
Q_Etiquetas	172
Q_Buffer_Preparacion_Empaque	171
Q_Empaques	171
Q_Buffer_Control_calidad	174
Q_Buffer _Empaque	0

Ilustración C1. (Jornada 1, calentamiento) Dashboard Output, throughput acumulado por cola.

Fuente: elaboración propia, captura de los dashboards del software FlexSim.

Staytime

Object	AvgStaytime	MinStaytime	MaxStaytime
Q_Moldes	1031.57	19.36	3200.28
Q_Buffer_Corte_Conf	10329.18	2452.54	24274.14
Q_Buffer_Preparacion_de_corte	7990.66	0.00	12640.59
Q_Buffer_Confeccion	13.85	4.01	14.14
Q_Buffer_Corte_hilos	12.73	2.86	12.79
Q_Buffer_Planchado	0.00	0.00	0.00
Q_Buffer_Acabados	0.00	0.00	0.00
Q_Buffer_Etiquetado	26.52	1.63	26.67
Q_Etiquetas	3181.57	2921.37	6269.26
Q_Buffer_Preparacion_Empaque	0.00	0.00	0.00
Q_Empaques	12226.34	3479.38	17186.13
Q_Buffer _Empaque	0.00	0.00	0.00
Q_Buffer_Control_calidad	1803.66	0.00	3705.45

Ilustración C2. (Jornada 1, calentamiento) Dashboard Staytime — tiempo medio de espera en cola por búfer.

Fuente: elaboración propia, captura de los dashboards del software FlexSim.

Staytime 1

Object	AvgStaytime	MinStaytime	MaxStaytime
Pegado de molde	23.33	0.00	137.50
P_Empaque	25.01	0.00	56.42
P_Etiquetado	8.45	0.00	19.97
P_Corte_Piezas	47.13	4.65	137.50
P_Org_Clasificacion	45.76	2.22	137.50
P_Corte_hilos	115.76	106.04	122.47
P_Revision_Calidad	148.10	133.50	159.76
P_Planchado	71.66	67.85	75.76
P_Union_Tiro_Trasero	125.42	46.76	139.17
P_Cierre_Delantero	125.60	25.09	139.17
P_Union_Tiro_Delantero	126.03	0.00	139.17
P_Coser_Bolsillo	126.89	118.04	139.17
P_Union_Bolsillo_Del	0.00	0.00	0.00
P_Ojales	8.40	6.02	11.63
P_Union_Pierna_Izq	55.49	22.90	95.33
P_Union_Pierna_Der	0.00	0.00	0.00
P_Bolsillo_Trasero	20.71	14.04	27.63
P_Acabados_Finales	57.44	53.05	61.98
P_Tentido de Tela	50.23	3.52	137.50
P_Definicion_Modelo	45.07	6.06	137.50

Ilustración C3. (Jornada 1, calentamiento) Dashboard Staytime 1 — tiempo de permanencia por estación.

Fuente: elaboración propia, captura de los dashboards del software FlexSim.

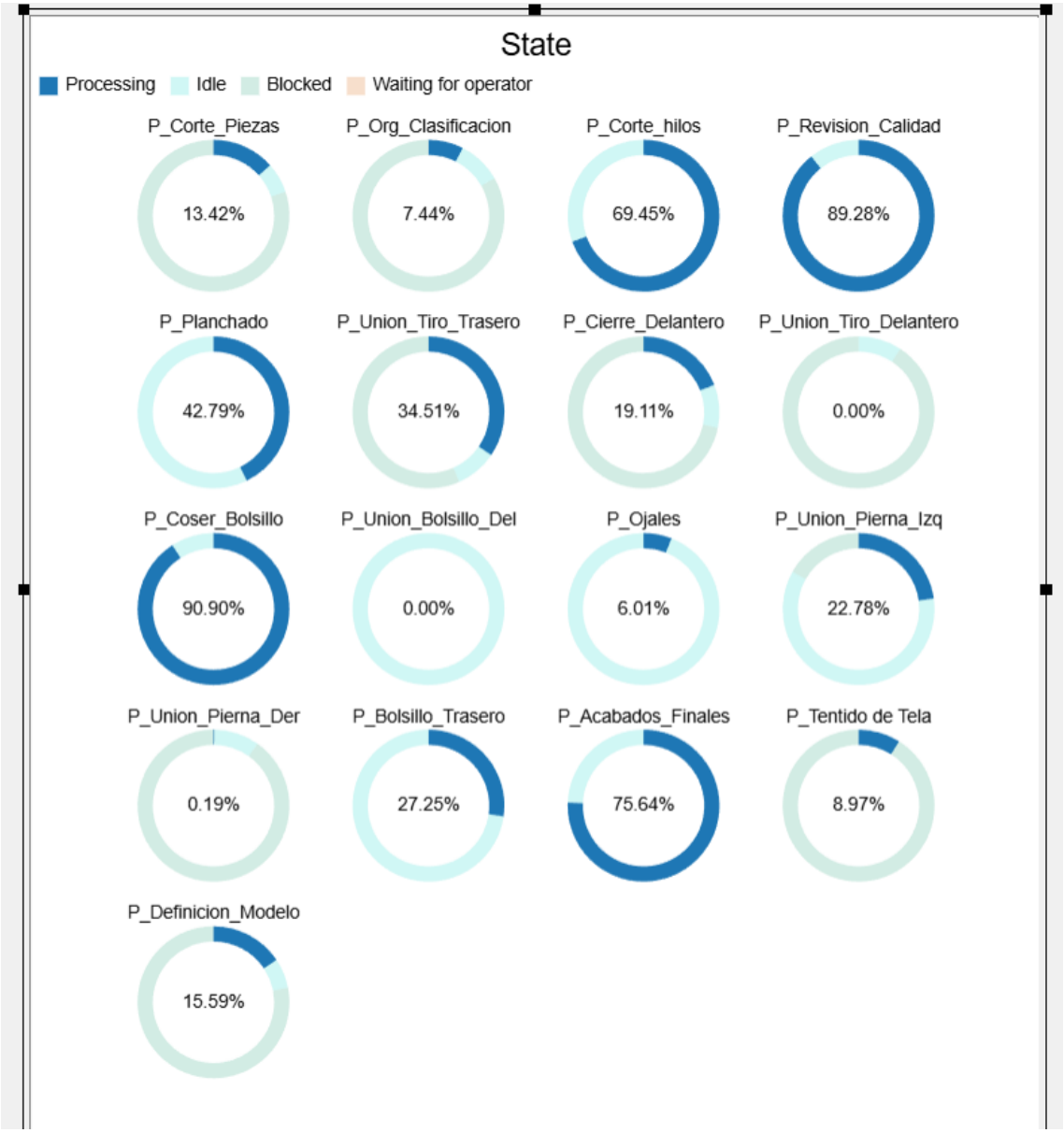


Ilustración C4. (Jornada 1, calentamiento) Dashboard State — utilización por estación.

Fuente: elaboración propia, captura de los dashboards del software FlexSim.

Content

Object	Current	Minimum	Maximum	Average
Q_Moldes	25	0	25	21.88
Q_Buffer_Corte_Conf	260	0	260	244.46
Q_Buffer_Preparacion_de_corte	99	0	100	80.07
Q_Buffer_Confeccion	0	0	1	0.10
Q_Buffer_Corte_hilos	0	0	1	0.08
Q_Buffer_Planchado	0	0	1	0.00
Q_Buffer_Acabados	0	0	1	0.00
Q_Buffer_Etiquetado	1	0	1	0.16
Q_Etiquetas	20	0	20	20.00
Q_Buffer_Preparacion_Empaque	0	0	1	0.00
Q_Empaques	100	0	100	98.37
Q_Buffer _Empaque	171	0	171	74.99
Q_Buffer_Control_calidad	29	0	29	12.76

Ilustración C5. (Jornada 1, calentamiento) Dashboard Content — contenido (prendas en cola) por búfer.

Fuente: elaboración propia, captura de los dashboards del software FlexSim.

Jornada 2 (régimen — base del diagnóstico)

Output

Object	Throughput
Q_Moldes	800
Q_Buffer_Corte_Conf	537
Q_Buffer_Preparacion_de_corte	437
Q_Buffer_Confeccion	430
Q_Buffer_Corte_hilos	367
Q_Buffer_Planchado	366
Q_Buffer_Acabados	367
Q_Buffer_Etiquetado	366
Q_Etiquetas	366
Q_Buffer_Preparacion_Empaque	366
Q_Empaques	366
Q_Buffer_Control_calidad	369
Q_Buffer _Empaque	0

Ilustración C6. (Jornada 2, régimen) Dashboard Output — throughput acumulado por cola..

Fuente: elaboración propia, captura de los dashboards del software FlexSim.

Staytime

Object	AvgStaytime	MinStaytime	MaxStaytime
Q_Moldes	1638.22	19.36	3220.11
Q_Buffer_Corte_Conf	19082.33	2452.54	32980.45
Q_Buffer_Preparacion_de_corte	10401.15	0.00	12676.34
Q_Buffer_Confeccion	13.89	4.01	14.14
Q_Buffer_Corte_hilos	12.76	2.86	12.79
Q_Buffer_Planchado	0.00	0.00	0.00
Q_Buffer_Acabados	0.00	0.00	0.00
Q_Buffer_Etiquetado	26.60	1.63	26.67
Q_Etiquetas	3065.20	2907.30	6269.26
Q_Buffer_Preparacion_Empaque	0.00	0.00	0.00
Q_Empaques	13602.90	3479.38	17186.13
Q_Buffer _Empaque	0.00	0.00	0.00
Q_Buffer_Control_calidad	3885.64	0.00	7771.42

Ilustración C7. (Jornada 2, régimen) Dashboard Staytime, tiempo medio de espera en cola.

Fuente: elaboración propia, captura de los dashboards del software FlexSim.

Staytime 1

Object	AvgStaytime	MinStaytime	MaxStaytime
Pegado de molde	34.69	0.00	139.92
P_Empaque	25.05	0.00	58.13
P_Etiquetado	8.48	0.00	19.98
P_Corte_Piezas	69.77	4.65	139.92
P_Org_Clasificacion	68.82	2.22	139.92
P_Corte_hilos	115.74	105.15	122.89
P_Revision_Calidad	148.01	132.26	159.76
P_Planchado	71.65	67.69	75.95
P_Union_Tiro_Trasero	126.09	46.76	139.92
P_Cierre_Delantero	126.18	25.09	139.92
P_Union_Tiro_Delantero	126.38	0.00	139.92
P_Coser_Bolsillo	126.80	118.01	139.92
P_Union_Bolsillo_Del	0.00	0.00	0.00
P_Ojales	8.46	6.02	11.87
P_Union_Pierna_Izq	56.01	22.90	98.79
P_Union_Pierna_Der	0.00	0.00	0.00
P_Bolsillo_Trasero	20.51	14.04	27.87
P_Acabados_Finales	57.40	53.05	61.98
P_Tentido de Tela	71.93	3.52	139.92
P_Definicion_Modelo	67.53	6.06	139.92

Ilustración C8. (Jornada 2, régimen) Dashboard Staytime 1, tiempo de permanencia por estación.

Fuente: elaboración propia, captura de los dashboards del software FlexSim.

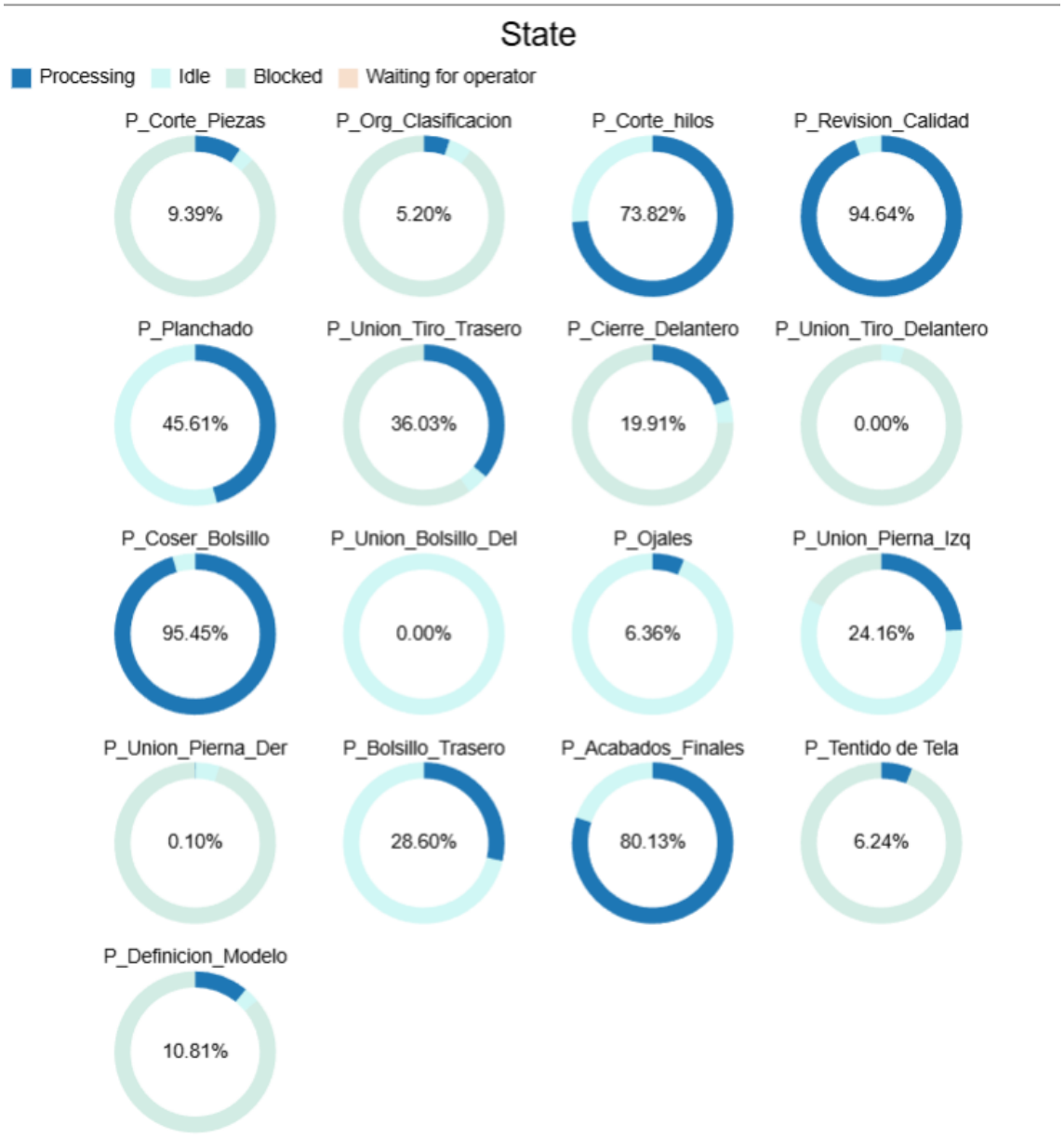


Ilustración C9. (Jornada 2, régimen) Dashboard State, utilización por estación.

Fuente: elaboración propia, captura de los dashboards del software FlexSim.

Content

Object	Current	Minimum	Maximum	Average
Q_Moldes	25	0	25	23.44
Q_Buffer_Corte_Conf	260	0	260	252.23
Q_Buffer_Preparacion_de_corte	100	0	100	89.87
Q_Buffer_Confeccion	0	0	1	0.10
Q_Buffer_Corte_hilos	0	0	1	0.08
Q_Buffer_Planchado	0	0	1	0.00
Q_Buffer_Acabados	0	0	1	0.00
Q_Buffer_Etiquetado	0	0	1	0.17
Q_Etiquetas	20	0	20	20.00
Q_Buffer_Preparacion_Empaque	0	0	1	0.00
Q_Empaques	100	0	100	99.18
Q_Buffer _Empaque	365	0	365	171.48
Q_Buffer_Control_calidad	61	0	62	29.01

Ilustración C10. (Jornada 2, régimen) Dashboard Content, contenido por búfer.

Fuente: elaboración propia, captura de los dashboards del software FlexSim.

Anexo D. Código Python. Los datos de entrada del programa provienen de las Tablas IVb, VI, VIII, IX, XII y XIV.

```
# ============================================================================
# figuras_tesis.py
# Generación de las figuras del Trabajo de Integración Curricular:
# "Estudio de teoría de colas para la optimización de tiempos de espera
#  en la empresa textil Tempocodeca Cía. Ltda."
# Autor: Jefferson Javier Santander Cabezas – UTN, FICA, Ingeniería Industrial
# Herramientas: Python 3 + Matplotlib. Los datos de entrada provienen de las
# Tablas IVa-IVe, V, VI, VIII, IX, XII y XIV del propio documento.
# Ejecución:  python figuras_tesis.py   (genera fig01.png ... fig11.png)
# ============================================================================
import numpy as np
import matplotlib
matplotlib.use("Agg")
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.patches import FancyArrowPatch, FancyBboxPatch, Circle

# ---- Estilo común de todas las figuras -------------------------------------
INK, AZUL, TEAL = "#22303E", "#2C5F8A", "#2E8B84"
NARANJA, ROJO, GRIS = "#D9772F", "#C0392B", "#8A959E"
plt.rcParams.update({
    "font.family": "DejaVu Sans", "font.size": 9.5,
    "axes.edgecolor": INK, "axes.labelcolor": INK,
    "xtick.color": INK, "ytick.color": INK,
    "axes.grid": True, "grid.color": "#D8DEE3", "grid.linewidth": 0.6,
    "figure.facecolor": "white", "savefig.dpi": 220,
    "savefig.bbox": "tight", "savefig.facecolor": "white"})

def caja(ax, x, y, w, h, texto, fc="#EDF2F6", ec=AZUL, fs=9, bold=False, r=0.06):
    """Dibuja un rectángulo redondeado con texto centrado (diagramas)."""
    ax.add_patch(FancyBboxPatch((x, y), w, h, fc=fc, ec=ec, lw=1.4,
                 boxstyle=f"round,pad=0.02,rounding_size={r}"))
    ax.text(x + w/2, y + h/2, texto, ha="center", va="center", fontsize=fs,
            color=INK, fontweight="bold" if bold else "normal")

def flecha(ax, x1, y1, x2, y2, color=INK, lw=1.6, estilo="-|>"):
    ax.add_patch(FancyArrowPatch((x1, y1), (x2, y2), arrowstyle=estilo,
                 mutation_scale=14, color=color, lw=lw))

# ============================================================================
# Fig. 1 – Estructura general de un sistema de colas
# ============================================================================
def fig01():
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(9.2, 3.2)); ax.axis("off"); ax.grid(False)
    ax.set_xlim(0, 10); ax.set_ylim(0, 3.4)
    ax.text(0.75, 2.9, "Fuente de entrada\n(llegadas, tasa λ)",
            ha="center", fontsize=9, color=INK)
    for i, dx in enumerate([0.35, 0.75, 1.15]):
        ax.add_patch(Circle((dx, 2.0), 0.14, fc=AZUL, ec=INK, lw=1))
    flecha(ax, 1.45, 2.0, 2.25, 2.0)
    caja(ax, 2.3, 1.55, 2.5, 0.9, "COLA\n(disciplina FIFO)", fc="#F5EBDD", ec=NARANJA)
    ax.text(3.55, 1.25, "Espera en cola: $W_q$, $L_q$", ha="center",
            fontsize=8.6, color=NARANJA)
    flecha(ax, 4.85, 2.0, 5.65, 2.0)
    for k, yy in enumerate([2.55, 2.0, 1.45]):
        caja(ax, 5.7, yy-0.22, 1.9, 0.46,
             f"Servidor {k+1}  (μ)" if k < 2 else "Servidor c  (μ)",
             fc="#E4EFEC", ec=TEAL, fs=8.6)
    ax.text(6.65, 0.95, "Mecanismo de servicio\n(c servidores en paralelo)",
            ha="center", fontsize=8.6, color=TEAL)
    flecha(ax, 7.65, 2.0, 8.45, 2.0)
    caja(ax, 8.5, 1.55, 1.35, 0.9, "Salida del\nsistema", fc="#EDF2F6")
    ax.annotate("", xy=(8.4, 3.05), xytext=(2.4, 3.05),
                arrowprops=dict(arrowstyle="<->", color=GRIS, lw=1.2))
    ax.text(5.4, 3.18, "Sistema: $L$, $W$   ·   utilización ρ = λ/(c·μ)",
            ha="center", fontsize=9, color=GRIS)
    fig.savefig("fig01.png"); plt.close(fig)

# ============================================================================
# Fig. 2 – Etapas metodológicas E1–E8
# ============================================================================
def fig02():
    et = [("E1", "Levantamiento\ndel proceso"), ("E2", "Recolección\nde datos (μ, λ)"),
          ("E3", "Ajuste estadístico\nExpertFit"), ("E4", "Diagnóstico con\nteoría de colas"),
          ("E5", "Construcción del\nmodelo FlexSim"), ("E6", "Verificación y\nvalidación (t)"),
          ("E7", "Lectura de\ndashboards"), ("E8", "Escenarios de\nmejora e IM%")]
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(9.6, 2.7)); ax.axis("off"); ax.grid(False)
```

```
        ax.set_xlim(0, 12.4); ax.set_ylim(0, 3.0)
        for fila in range(2):
            for col in range(4):
                i = fila*4 + col
                x = 0.3 + col*3.05; y = 1.7 - fila*1.35
                caja(ax, x, y, 2.55, 0.95, f"{et[i][0]}\n{et[i][1]}",
                     fc="#EDF2F6" if i not in (3, 5) else "#E4EFEC",
                     ec=AZUL if i not in (3, 5) else TEAL, fs=8.4)
                if col < 3:
                    flecha(ax, x+2.58, y+0.475, x+3.02, y+0.475)
        # Conexión E4 -> E5 (cambio de fila) por el pasillo entre las dos filas
        xE4 = 0.3 + 3*3.05 + 1.275   # centro horizontal de E4
        xE5 = 0.3 + 1.275            # centro horizontal de E5
        ax.plot([xE4, xE4, xE5], [1.68, 1.5, 1.5], color=INK, lw=1.6,
                solid_capstyle="round", zorder=1)
        flecha(ax, xE5, 1.5, xE5, 1.34, lw=1.6)
        fig.savefig("fig02.png"); plt.close(fig)

    # ============================================================================
    # Fig. 3 — Histograma y distribución beta ajustada, tarea Coser bolsillo
    # Datos: Tabla IVb (n = 60). Ajuste: beta(116.40, 146.63, 2.35, 3.70) — Tabla V
    # ============================================================================
    D64 = [122,127,129,137,127,127,121,138,124,124,131,123,128,124,131,117,131,122,
           129,125,121,127,130,136,130,124,135,135,123,130,124,132,129,119,133,125,
           123,133,136,125,127,144,123,121,127,131,124,129,127,122,146,122,130,134,
           133,130,117,135,133,131]
    def fig03():
        from scipy.stats import beta as beta_dist
        a, b, s1, s2 = 116.40, 146.63, 2.35, 3.70
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(7.6, 4.4))
        ax.hist(D64, bins=10, density=True, color="#BFD3E2", edgecolor=AZUL,
                lw=1.1, label="Observaciones (n = 60)")
        x = np.linspace(a, b, 400)
        ax.plot(x, beta_dist.pdf(x, s1, s2, loc=a, scale=b-a), color=ROJO, lw=2.4,
                label="Beta ajustada (ExpertFit)")
        ax.axvline(np.mean(D64), color=INK, ls="--", lw=1.2)
        ax.text(np.mean(D64)+0.6, ax.get_ylim()[1]*0.93,
                f"media = {np.mean(D64):.2f} s", fontsize=9)
        ax.set_xlabel("Tiempo de servicio (s)"); ax.set_ylabel("Densidad")
        ax.legend(frameon=False, loc="upper right")
        ax.text(0.02, 0.95, "CV = 0,047 · K-S: p > 0,05", transform=ax.transAxes,
                fontsize=9, color=TEAL, va="top")
        fig.savefig("fig03.png"); plt.close(fig)

    # ============================================================================
    # Fig. 4 — Red de colas en tándem del proceso
    # ============================================================================
    def fig04():
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(9.6, 2.6)); ax.axis("off"); ax.grid(False)
        ax.set_xlim(0, 13); ax.set_ylim(0, 3.0)
        areas = [("CORTE", "5 estaciones G/G/1\n(nivel lote)", "0,50 lotes/h", "#F5EBDD", NARANJA),
                 ("CONFECCIÓN", "10 estaciones G/G/1\nen serie", "λ = 32,5 und/h", "#EDF2F6", AZUL),
                 ("CALIDAD", "2 estaciones G/G/1\nACT 7 = restricción", "32,5 und/h", "#F9E4E1", ROJO),
                 ("EMPAQUE", "3 estaciones G/G/1\nsin congestión", "32,5 und/h", "#E4EFEC", TEAL)]
        x = 0.4
        for i, (nom, sub, lam, fc, ec) in enumerate(areas):
            caja(ax, x, 1.0, 2.5, 1.25, f"{nom}\n{sub}", fc=fc, ec=ec, fs=8.4, bold=False)
            if i < 3:
                caja(ax, x+2.62, 1.32, 0.5, 0.6, "buf", fc="white", ec=GRIS, fs=7.5)
                flecha(ax, x+2.5, 1.62, x+2.62, 1.62, lw=1.3)
                flecha(ax, x+3.12, 1.62, x+3.28, 1.62, lw=1.3)
                ax.text(x+2.87, 2.35, lam if i > 0 else "1,61 lotes/h",
                        ha="center", fontsize=7.8, color=GRIS)
            x += 3.28
        ax.text(0.4, 0.45, "Llegadas al sistema: 260 und/turno (λ = 32,5 und/h; "
                "tiempo medio entre llegadas = 110,8 s) · disciplina FIFO",
                fontsize=8.6, color=INK)
        fig.savefig("fig04.png"); plt.close(fig)

    # ============================================================================
    # Fig. 5 — Factor de utilización por estación (Tabla VI)
    # ============================================================================
    EST = ["6.1 Unión tiro tras.", "6.2 Coser cierre", "6.3 Unión tiro del.",
           "6.4 Coser bolsillo", "6.5 Unión bolsillo", "6.6 Ojales",
           "6.7 Unión pierna izq.", "6.8 Unión pierna der.", "6.9 Bolsillo tras.",
           "6.10 Acabados", "7 Revisión y limpieza", "8 Corte de hilos",
           "9 Planchado", "10 Etiquetado", "11 Empaque"]
    RHO = [0.427, 0.247, 0.840, 1.158, 0.439, 0.075, 0.297, 0.505, 0.179,
           0.519, 1.339, 1.047, 0.652, 0.151, 0.449]
    def fig05():
```

```
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(9.2, 4.1))
        colores = [ROJO if r >= 1 else (NARANJA if r >= 0.8 else AZUL) for r in RHO]
        bars = ax.bar(range(len(EST)), RHO, color=colores, edgecolor=INK, lw=0.6)
        ax.axhline(1.0, color=ROJO, ls="--", lw=1.6)
        ax.text(len(EST)-0.4, 1.03, "límite de estabilidad ρ = 1",
                ha="right", color=ROJO, fontsize=9)
        ax.axhline(0.85, color=NARANJA, ls=":", lw=1.2)
        ax.text(len(EST)-0.4, 0.87, "zona segura ρ < 0,85",
                ha="right", color=NARANJA, fontsize=8.2)
        for b, r in zip(bars, RHO):
            if r >= 0.8:
                ax.text(b.get_x()+b.get_width()/2, r+0.03, f"{r:.3f}".replace(".", ","),
                        ha="center", fontsize=8, fontweight="bold", color=INK)
        ax.set_xticks(range(len(EST)))
        ax.set_xticklabels(EST, rotation=45, ha="right", fontsize=8)
        ax.set_ylabel("Utilización ρ = λ/(c·μ)"); ax.set_ylim(0, 1.55)
        fig.savefig("fig05.png"); plt.close(fig)

    # ============================================================================
    # Fig. 6 — Esquema del modelo de simulación (objetos y conexiones, Tabla III)
    # ============================================================================
    def fig06():
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(9.6, 4.3)); ax.axis("off"); ax.grid(False)
        ax.set_xlim(0, 13.4); ax.set_ylim(0, 6.2)
        # Carriles por área
        lanes = [("CORTE (nivel lote)", 4.7, "#FBF3E7"), ("CONFECCIÓN (10 procesadores en serie)", 3.2,
    "#EEF3F8"),
                 ("CALIDAD", 1.7, "#FBEAE7"), ("EMPAQUE", 0.2, "#E9F3F0")]
        for nom, y, fc in lanes:
            ax.add_patch(FancyBboxPatch((0.15, y), 13.05, 1.35, fc=fc, ec="#C8D2DA",
                         lw=1, boxstyle="round,pad=0.02"))
            ax.text(0.3, y+1.18, nom, fontsize=8.2, color=GRIS, fontweight="bold", va="top")
        # Corte
        obj = [("Source\nTelas", "#DCE9F5"), ("Queue\nQ_Telas", "white"),
               ("Proc.\nACT 1", "#DCE9F5"), ("Proc.\nACT 2", "#DCE9F5"),
               ("Comb.\nACT 3", "#DCE9F5"), ("Proc.\nACT 4", "#DCE9F5"),
               ("Proc.\nACT 5", "#DCE9F5"), ("Queue\nbúfer→Conf.", "white")]
        x = 0.55
        for i, (t, fc) in enumerate(obj):
            caja(ax, x, 4.85, 1.28, 0.75, t, fc=fc, ec=AZUL, fs=7)
            if i < len(obj)-1: flecha(ax, x+1.3, 5.22, x+1.5, 5.22, lw=1.1)
            x += 1.52
        # Confección: 10 procesadores
        x = 0.55
        for k in range(10):
            caja(ax, x, 3.35, 1.05, 0.75, f"P 6.{k+1}", fc="#DCE9F5", ec=AZUL, fs=7)
            if k < 9: flecha(ax, x+1.07, 3.72, x+1.22, 3.72, lw=1.0)
            x += 1.24
        caja(ax, x, 3.35, 0.62, 0.75, "buf", fc="white", ec=GRIS, fs=7)
        # Calidad
        caja(ax, 0.55, 1.85, 1.5, 0.75, "Queue\ncontrol calidad", fc="white", ec=GRIS, fs=7)
        caja(ax, 2.35, 1.85, 1.8, 0.75, "Proc. ACT 7\nRevisión (ρ=1,34)", fc="#F6D5CE", ec=ROJO, fs=7)
        caja(ax, 4.45, 1.85, 1.8, 0.75, "Proc. ACT 8\nCorte de hilos", fc="#F6D5CE", ec=ROJO, fs=7)
        caja(ax, 6.55, 1.85, 1.1, 0.75, "buf", fc="white", ec=GRIS, fs=7)
        for x1, x2 in [(2.07, 2.33), (4.17, 4.43), (6.27, 6.53)]:
            flecha(ax, x1, 2.22, x2, 2.22, lw=1.1)
        # Empaque
        emq = [("Proc. ACT 9\nPlanchado", "#DCEEE8"), ("Comb. ACT 10\nEtiquetado", "#DCEEE8"),
               ("Comb. ACT 11\nEmpaque", "#DCEEE8"), ("Sink\nDespacho", "#C9E2D8")]
        x = 0.55
        for i, (t, fc) in enumerate(emq):
            caja(ax, x, 0.35, 1.9, 0.75, t, fc=fc, ec=TEAL, fs=7)
            if i < 3: flecha(ax, x+1.92, 0.72, x+2.12, 0.72, lw=1.1)
            x += 2.14
        ax.text(9.4, 0.72, "+ Sources de Moldes, Etiquetas y Empaques\n"
                "38 objetos fijos · 21 Operators", fontsize=7.6, color=GRIS, va="center")
        # Flechas entre carriles
        for y1, y2 in [(4.83, 4.12), (3.33, 2.62), (1.83, 1.12)]:
            flecha(ax, 13.0, y1, 13.0, y2, lw=1.3, color=GRIS)
        fig.savefig("fig06.png"); plt.close(fig)

    # ============================================================================
    # Fig. 7 — Throughput simulado vs. referencia analítica (Tabla IX)
    # ============================================================================
    THR = [194, 193, 197, 192, 194, 193, 193, 195, 191, 192]
    def fig07():
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(8.4, 3.6))
        reps = np.arange(1, 11)
        ax.axhline(194, color=ROJO, ls="--", lw=1.8,
                   label="Referencia analítica: 194 und/turno (Tabla VI)")
```

```
        ax.axhline(np.mean(THR), color=TEAL, ls="-", lw=1.4,
                   label=f"Media simulada: {np.mean(THR):.1f} und/turno".replace(".", ","))
        ax.plot(reps, THR, "o-", color=AZUL, lw=1.4, ms=7, mec=INK, label="Réplicas de FlexSim")
        for r, t in zip(reps, THR):
            ax.annotate(str(t), (r, t), textcoords="offset points", xytext=(0, 8),
                        ha="center", fontsize=8)
        ax.set_xticks(reps); ax.set_xlabel("Réplica (Experimenter)")
        ax.set_ylabel("Throughput (und/turno)"); ax.set_ylim(186, 201)
        ax.legend(frameon=False, loc="lower right", fontsize=8.4)
        ax.text(0.02, 0.06, "Prueba t pareada: t = −1,108; p = 0,297 > 0,05 → modelo válido",
                transform=ax.transAxes, fontsize=9, color=INK)
        fig.savefig("fig07.png"); plt.close(fig)

    # ============================================================================
    # Fig. 8 — Crecimiento proyectado de las colas críticas (modelo fluido, Ec. 9)
    # ACT 6.4: (32,5 − 28,1) und/h · ACT 7: (28,1 − 24,3) und/h · T = 8 h
    # ============================================================================
    def fig08():
        t = np.linspace(0, 8, 200)
        q64 = (32.5 - 28.1) * t
        q7 = (28.1 - 24.3) * t
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(8.4, 3.6))
        ax.plot(t, q64, color=AZUL, lw=2.2, label="ACT 6.4 Coser bolsillo: Nq(T) = (λ−μ)·T")
        ax.plot(t, q7, color=NARANJA, lw=2.2, label="ACT 7 Revisión y limpieza (flujo en serie)")
        ax.plot(t, q64+q7, color=ROJO, lw=1.6, ls="--", label="Acumulación total en estaciones críticas")
        ax.annotate("≈ 35 und", (8, q64[-1]), xytext=(-52, 4), textcoords="offset points",
                    color=AZUL, fontsize=9, fontweight="bold")
        ax.annotate("≈ 30 und", (8, q7[-1]), xytext=(-52, 4), textcoords="offset points",
                    color=NARANJA, fontsize=9, fontweight="bold")
        ax.annotate("≈ 66 und = déficit diario", (8, (q64+q7)[-1]), xytext=(-118, 6),
                    textcoords="offset points", color=ROJO, fontsize=9, fontweight="bold")
        ax.set_xlabel("Tiempo de jornada (h)"); ax.set_ylabel("Unidades acumuladas en cola")
        ax.set_xlim(0, 8.4); ax.legend(frameon=False, fontsize=8.4, loc="upper left")
        fig.savefig("fig08.png"); plt.close(fig)

    # ============================================================================
    # Fig. 9 — Comparación de escenarios simulados (Tabla XII)
    # ============================================================================
    def fig09():
        esc = ["Estado actual", "Escenario A\n(+3 operarios)",
               "Escenario B\n(rebalanceo)", "Escenario C\n(−15 % tiempos)"]
        thr = [193.4, 258.8, 258.3, 227.5]
        wq = [72.4, 1.0, 1.3, 33.9]  # Wq Confección + Calidad (min), Tabla XII
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(8.6, 3.9))
        cols = [GRIS, AZUL, TEAL, NARANJA]
        bars = ax.bar(esc, thr, color=cols, edgecolor=INK, lw=0.7, width=0.58)
        ax.axhline(260, color=ROJO, ls="--", lw=1.5)
        ax.text(3.42, 263, "demanda: 260 und/turno", ha="right", color=ROJO, fontsize=8.6)
        for b, v in zip(bars, thr):
            ax.text(b.get_x()+b.get_width()/2, v+4, f"{v:.1f}".replace(".", ","),
                    ha="center", fontsize=9, fontweight="bold")
        ax.set_ylabel("Throughput (und/turno)"); ax.set_ylim(0, 300)
        ax2 = ax.twinx(); ax2.grid(False)
        ax2.plot(esc, wq, "D--", color=ROJO, lw=1.6, ms=7, mec=INK)
        for i, v in enumerate(wq):
            ax2.annotate(f"{v:.1f} min".replace(".", ","), (i, v),
                         textcoords="offset points", xytext=(10, 6),
                         fontsize=8.4, color=ROJO)
        ax2.set_ylabel("Espera total en estaciones críticas (min)", color=ROJO)
        ax2.tick_params(axis="y", labelcolor=ROJO); ax2.set_ylim(0, 90)
        fig.savefig("fig09.png"); plt.close(fig)

    # ============================================================================
    # Fig. 10 — Ciclo de focalización de la TOC aplicado a la línea
    # ============================================================================
    def fig10():
        pasos = [("1. IDENTIFICAR", "ACT 7 Revisión y limpieza\n(ρ = 1,339, Tabla VI)"),
                 ("2. EXPLOTAR", "Asegurar flujo continuo\nen la restricción"),
                 ("3. SUBORDINAR", "El resto de la línea marcha\nal ritmo de ACT 7"),
                 ("4. ELEVAR", "Movimientos M1–M3:\nrebalanceo y polifuncionalidad"),
                 ("5. REPETIR", "Nueva restricción: ACT 6.3\n(vigilar si demanda > 300)")]
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(9.6, 2.5)); ax.axis("off"); ax.grid(False)
        ax.set_xlim(0, 13); ax.set_ylim(0, 2.6)
        x = 0.3
        for i, (tit, cuerpo) in enumerate(pasos):
            fc = "#F9E4E1" if i == 0 else ("#E4EFEC" if i == 3 else "#EDF2F6")
            ec = ROJO if i == 0 else (TEAL if i == 3 else AZUL)
            caja(ax, x, 0.7, 2.3, 1.25, f"{tit}\n{cuerpo}", fc=fc, ec=ec, fs=7.6)
            if i < 4: flecha(ax, x+2.33, 1.32, x+2.55, 1.32)
            x += 2.58
```

```
        ax.annotate("", xy=(1.45, 0.62), xytext=(11.2, 0.42),
                    arrowprops=dict(arrowstyle="-|>", color=GRIS, lw=1.3,
                                    connectionstyle="arc3,rad=0.25"))
        ax.text(6.4, 0.12, "mejora continua: el ciclo se reinicia sobre la nueva restricción",
                ha="center", fontsize=8, color=GRIS)
        fig.savefig("fig10.png"); plt.close(fig)

    # ============================================================================
    # Fig. 11 — Cronograma de implementación (Tabla XIV)
    # ============================================================================
    def fig11():
        fases = [("F1. Socialización y diagnóstico", 1, 2),
                 ("F2. Capacitación cruzada", 2, 4),
                 ("F3. Prueba piloto", 5, 6),
                 ("F4. Estandarización", 6, 8),
                 ("F5. Seguimiento y ajuste", 7, 10)]
        cols = [AZUL, TEAL, NARANJA, "#7B5EA7", GRIS]
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(8.8, 3.0))
        for i, ((nom, ini, fin), c) in enumerate(zip(fases, cols)):
            ax.barh(len(fases)-1-i, fin-ini+1, left=ini-0.5, height=0.55,
                    color=c, edgecolor=INK, lw=0.7)
            ax.text(ini-0.62, len(fases)-1-i, nom, ha="right", va="center", fontsize=8.6)
        ax.set_yticks([]); ax.set_xticks(range(1, 11))
        ax.set_xticklabels([f"S{k}" for k in range(1, 11)])
        ax.set_xlabel("Semana"); ax.set_xlim(0.5, 10.5)
        ax.set_ylim(-0.6, len(fases)-0.4)
        for sp in ["top", "right", "left"]: ax.spines[sp].set_visible(False)
        fig.savefig("fig11.png"); plt.close(fig)

    if __name__ == "__main__":
        for f in (fig01, fig02, fig03, fig04, fig05, fig06,
                  fig07, fig08, fig09, fig10, fig11):
            f()
        print("11 figuras generadas.")
```