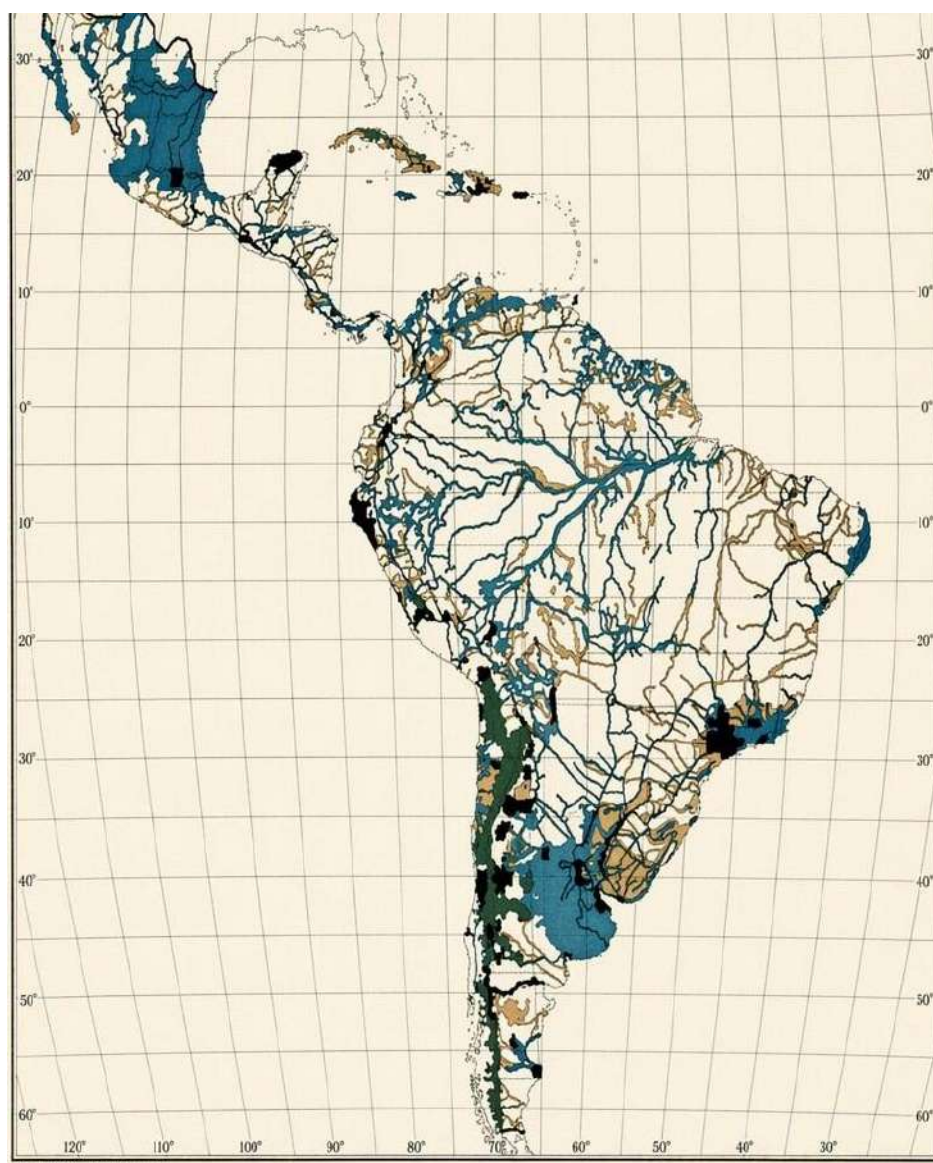


Revista Latinoamericana de Difusión Científica



Volumen 8 - Número 15
Julio – Diciembre 2026
Maracaibo – Venezuela

Diseño de un modelo de optimización de balance de línea para incrementar la eficiencia y reducir los costos en la producción de prendas del sector textil boliviano

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21498382>

Lin Gerver Raimundo Machaca Callata*

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo diseñar un modelo de optimización de balance de línea para incrementar la eficiencia de producción de prendas y reducir los costos de ensamblaje. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo aplicado, de alcance descriptivo y explicativo, tomando como unidad de análisis el área de confección de una empresa del rubro. Se formuló un modelo matemático de programación lineal mixta que, a partir del estudio de tiempos por operación, la secuencia operacional, la eficiencia real y la disponibilidad de máquinas, determina el número de máquinas y operarios requeridos, identifica el cuello de botella y genera tres escenarios de operación: línea base, línea máxima y línea optimizada. El modelo se validó en GAMS y se amplió en Python para la lectura automática de datos, el cálculo de escenarios, la generación de reportes y el análisis de stock de máquinas. Para una prenda liviana representativa (polera manga corta de cuello redondo), la línea optimizada incrementó la producción de 60 a 97 prendas por hora y de 660 a 1067 prendas por turno, elevó la utilización promedio de máquinas de 87,82 % a 99,39 % y redujo el tiempo de ciclo de 60 a 37,11 segundos por prenda, con un incremento de personal de 9 a 12 trabajadores y tres máquinas adicionales. El contraste de hipótesis confirmó simultáneamente el aumento de la eficiencia y la reducción del costo unitario de mano de obra. Se concluye que el modelo constituye una herramienta de apoyo confiable para pasar de una asignación empírica de recursos a una asignación cuantitativa basada en datos.

PALABRAS CLAVE: Balance de línea, Optimización, Eficiencia de producción, Confección textil, Cuello de botella, Programación lineal, costos de producción.

*Estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Mención Gestión de la Innovación y Prospección Empresarial. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1722-9415>. E-mail: Linmachaca@gmail.com

Line-Balancing Optimization Model Design to Increase Efficiency and Reduce Costs in Garment Production in the Bolivian Textile Sector

ABSTRACT

This work aimed to design a line-balancing optimization model to increase garment production efficiency and reduce assembly costs. The study followed an applied quantitative approach with a descriptive and explanatory scope, using the sewing area of a garment company as the unit of analysis. A mixed linear programming model was formulated that, based on the time study per operation, the operational sequence, the actual efficiency and machine availability, determines the required number of machines and operators, identifies the bottleneck and generates three operating scenarios: base, maximum and optimized lines. The model was validated in GAMS and extended in Python for automatic data reading, scenario computation, report generation and machine-stock analysis. For a representative light garment (short-sleeve round-neck T-shirt), the optimized line increased output from 60 to 97 garments per hour and from 660 to 1067 garments per shift, raised average machine utilization from 87.82 % to 99.39 % and reduced cycle time from 60 to 37.11 seconds per garment, with a personnel increase from 9 to 12 workers and three additional machines. Hypothesis testing simultaneously confirmed the efficiency increase and the reduction of unit labor cost. The model is a reliable decision-support tool to move from empirical to data-driven resource allocation.

KEYWORDS: Line balancing, Optimization, Production efficiency, Garment manufacturing, Bottleneck, Linear programming, Production costs.

Introducción

La industria textil y de la confección constituye uno de los sectores productivos de mayor relevancia social y económica en Bolivia, por su capacidad de generar empleo y de vincular a numerosas familias a la cadena productiva. No obstante, gran parte de las micro, pequeñas y medianas empresas (MyPES y PyMES) del rubro opera con sistemas tradicionales de producción que limitan su eficiencia y competitividad frente a un mercado que exige calidad, precios menores y plazos de entrega cada vez más cortos.

En las líneas de ensamblaje de prendas, la ausencia de criterios técnicos para la asignación de operaciones, máquinas y personal provoca acumulación de inventario en proceso (WIP), desbalance de capacidades, presencia de cuellos de botella y tiempos improductivos. Estos factores incrementan los costos de producción y dificultan el

cumplimiento de los plazos comprometidos. Ante esta situación, el balance de línea y las técnicas de optimización de la investigación de operaciones se presentan como herramientas adecuadas para analizar y mejorar el desempeño del proceso productivo (Becker y Scholl, 2006; Heizer et al., 2017).

La revisión de la literatura nacional evidencia un vacío relevante: en Bolivia la producción científica sobre el sector textil se orienta principalmente a técnicas de mejora cualitativa, como las herramientas de manufactura esbelta, sin la aplicación de modelos matemáticos de optimización al balanceo de líneas de confección (Jiménez Aguilar, 2023). Este vacío justifica el desarrollo de una herramienta cuantitativa adaptada a la realidad de las MyPES y PyMES del país.

El presente artículo propone el diseño de un modelo de optimización para el balance de línea en el área de confección, formulado como un problema de programación lineal y validado mediante dos herramientas computacionales complementarias: GAMS, que sustenta la estructura matemática, y Python, que amplía el análisis con la lectura automática de datos, la generación de reportes y la evaluación del stock de máquinas disponibles. El objetivo general es diseñar un modelo que permita incrementar la eficiencia en la producción de prendas y reducir los costos en las operaciones de ensamblaje. La pregunta de investigación que guía el trabajo es: ¿cómo debe diseñarse e implementarse un modelo de optimización que incremente la eficiencia en la producción de prendas y reduzca los costos en las operaciones de ensamblaje del área de confección?

1. Trabajos relacionados

En el ámbito latinoamericano, Mesa Grajales y Bedoya Vega (2009) formularon un modelo de programación lineal con variables binarias para el balanceo de líneas en confección, validado con QSB y GAMS, reduciendo la ociosidad de la línea a 5,77 % y elevando la producción a 1306 prendas por turno. Carvallo Munar (2014) aplicó conceptos de manufactura esbelta a una línea de costura de tejido de punto y demostró que el sistema de paquete progresivo concentra el 99,75 % del tiempo de la prenda en esperas, mientras que su rediseño en flujo unitario con disposición en U reduce el lead time en 78 % y el inventario en proceso en 77 %. Ortiz Porras et al. (2022) aplicaron un modelo Lean con metodología DMAIC en una empresa de ropa antifiama, aumentando la efectividad global de los equipos (OEE) de 56 % a 84 % y la productividad hora-hombre en 20 %.

En el campo de la modelación matemática y la simulación, Abtew et al. (2020) desarrollaron un balanceo de línea basado en optimización por simulación para el ensamblaje de prendas complejas, estableciendo una correlación negativa fuerte ($r = -0,853$) entre el minuto estándar permitido (SAM) y la eficiencia de costura. Grieco et al. (2017) modelaron la planificación de la producción con programación entera mixta y por restricciones dentro de un sistema de soporte a decisiones bajo el paradigma de la Industria 4.0. Zhang et al. (2024) formularon un modelo de programación lineal entera mixta multiobjetivo que optimiza simultáneamente el makespan y el consumo energético en líneas de costura.

La literatura muestra una evolución que va desde los modelos clásicos de programación lineal y entera (Becker y Scholl, 2006; Mesa Grajales y Bedoya Vega, 2009) hacia enfoques que combinan simulación e inteligencia computacional (Abtew et al., 2020; Grieco et al., 2017). Sin embargo, la mayoría de estos trabajos se aplicó en industrias de gran escala, por lo que persiste la necesidad de adaptar estas herramientas a las condiciones de las pequeñas y medianas empresas del sector textil boliviano.

2. Materiales y métodos

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo aplicado, de alcance descriptivo y explicativo. Trabaja con datos medibles (tiempos estándar, número de operaciones, tipo de máquina, número de operarios, máquinas disponibles, producción objetivo, eficiencia, tiempo de ciclo, capacidad por hora, utilización de maquinaria y costos de mano de obra) para caracterizar la situación actual del proceso y explicar cómo la redistribución de operaciones y recursos puede mejorar el desempeño productivo.

La unidad de análisis fue el área de confección de una empresa del sector textil. El muestreo fue no probabilístico, por criterios técnicos y productivos: se seleccionaron dos prendas representativas, una liviana (polera manga corta de cuello redondo) y una pesada (chamarra de mayor complejidad operacional). Los resultados que se reportan corresponden a la prenda liviana, con los siguientes parámetros de partida: producción objetivo de 60 prendas/hora, eficiencia esperada del 80 % y jornada de 11 horas.

2.1. Caracterización del proceso y datos de entrada

El proceso de confección se representa como un sistema de operaciones secuenciales que deben asignarse y dimensionarse de forma eficiente con relación a máquinas, operarios, capacidad y producción objetivo. Los datos mínimos de entrada son la secuencia operacional, el tiempo por operación (segundos/prenda) y el tipo de máquina; opcionalmente se registran predecesora, sucesora, nivel y descripción. El tiempo estándar total de confección de la prenda se obtiene como la suma de los tiempos de las n operaciones:

$$TE = \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

donde t_i es el tiempo estándar de la operación i y n el número total de operaciones.

2.2. Formulación matemática del modelo

El modelo incorpora un factor de pérdida o desempeño por operación f_i . El tiempo estándar corregido y el tiempo real ajustado por la eficiencia E son:

$$t_i^E = TS_i(1 + f_i) \quad (2)$$

$$t_i^R = t_i^E / E \quad (3)$$

con TS_i el tiempo base registrado de la operación i . La capacidad de cada operación, en prendas por hora, es

$$Q_i = 3600E / t_i^E \quad (4)$$

Dado que varias operaciones comparten el mismo tipo de máquina, el modelo agrupa los tiempos por recurso productivo mediante el parámetro G_{ie} , que vale 1 si la operación i pertenece a la máquina e :

$$T_e^E = \sum_{i=1}^n t_i^E G_{ie}, \quad T_e^R = \sum_{i=1}^n t_i^R G_{ie} \quad (5)$$

El requerimiento de máquinas por tipo se calcula a partir de la producción objetivo P_h y se redondea al entero superior con una tolerancia numérica τ :

$$M_e^{teo} = P_h T_e^E / 3600E \quad (6)$$

$$M_e = \text{ceil}(M_e^{teo} - \tau) \quad (7)$$

Con ello, la capacidad horaria por tipo de máquina resulta

$$C_e = 3600M_eE / T_e^E \quad (8)$$

El recurso con menor C_e constituye el cuello de botella, ya que limita la producción total de la línea. El requerimiento de personal se obtiene agrupando los tiempos reales según el tipo de trabajador g (confeccionistas o manuales), mediante el parámetro R_g :

$$Tg^{P,R} = \sum_e T_e^R Rge \quad (9)$$

$$Pg^{teo} = P_h Tg^{P,R} / 3600 \quad (10)$$

$$Pg = \text{ceil}(Pg^{teo} - \tau) \quad (11)$$

2.3. Escenarios de operación

El modelo genera tres escenarios. En la línea base se calculan los recursos para cumplir la producción objetivo; la producción por turno, el tiempo de ciclo objetivo y la utilización de máquinas son

$$P_{turno}^{obj} = P_h H, \quad TC^{obj} = 3600/P_h, \quad U_e^{base} = 100P_h/C_e^{base} \quad (12)$$

y la utilización promedio ponderada por número de máquinas es

$$U_{prom}^{base} = (\sum_e U_e^{base} M_e) / (\sum_e M_e) \quad (13)$$

La línea máxima determina la mayor producción posible condicionada por el cuello de botella:

$$P_{max} = \text{floor}(\min_e(C_e^{base}) + \tau), \quad TC_{max} = 3600/P_{max} \quad (14)$$

La línea optimizada recalcula la producción a partir de una utilización promedio objetivo de máquinas, buscando elevar la producción horaria y la utilización sin saturación excesiva de recursos.

2.4. Contraste de hipótesis

Se definen los promedios de eficiencia (μE) y de costo unitario (μC) con y sin aplicación del modelo. Las hipótesis son

$$H_0: \mu E(M) \leq \mu E(0) \wedge \mu C(M) \geq \mu C(0) \quad (15)$$

$$H_1: \mu E(M) > \mu E(0) \wedge \mu C(M) < \mu C(0) \quad (16)$$

El escenario sin modelo se asocia a la línea base y el escenario con modelo a la línea optimizada. Se rechaza H_0 si, de forma simultánea, la eficiencia promedio aumenta y el costo unitario promedio disminuye.

2.5. Implementación computacional

El modelo se validó primero en GAMS, que sustenta la estructura matemática y la lógica de optimización a través de los conjuntos de operaciones (t), tipos de máquina (e), tipos de personal (g), escenarios (esc) e indicadores comparativos (k). Posteriormente se amplió en Python, organizado en nueve módulos (parámetros, lectura y validación de datos,

cálculo del balance, resultados, gráficas, tablas, diagrama de recorrido, análisis de stock de máquinas y resumen ejecutivo). La etapa de validación normaliza nombres de máquinas (tildes, espacios y caracteres especiales) y descarta filas con tiempos no numéricos o no positivos, evitando errores de agrupamiento y de cálculo de capacidad.

3. Resultados

La Tabla 1 compara los indicadores principales de los tres escenarios para la prenda liviana, obtenidos con el modelo en GAMS y replicados en Python. La línea optimizada incrementa la producción de 60 a 97 prendas por hora y de 660 a 1067 prendas por turno, eleva la utilización promedio de máquinas de 87,82 % a 99,39 % y reduce el tiempo de ciclo de 60 a 37,11 segundos por prenda, con un incremento de personal de 9 a 12 trabajadores y tres máquinas adicionales respecto a la línea base.

Tabla 1. Comparación de indicadores entre escenarios de la línea de confección (prenda liviana)

Indicador	Base	Máxima	Optimizada
Producción [prendas/hora]	60	65	97
Producción [prendas/turno]	660	715	1067
Tiempo de ciclo [s/prenda]	60	55,39	37,11
Confeccionistas [pers.]	7	7	10
Manuales [pers.]	2	2	2
Total personal [pers.]	9	9	12
Total máquinas [unid.]	11	11	14
Máquinas adicionales [unid.]	0	0	3
Utilización promedio [%]	87,82	95,15	99,39
Cuello de botella [prendas/h]	65	65	65
Incremento/hora [prendas/h]	0	5	37
Incremento/turno [prendas/t]	0	55	407

El análisis por tipo de máquina (Tabla 2) identifica a la overlock 514 como el recurso cuello de botella, con la menor capacidad horaria y la utilización más alta de la línea. Este resultado evidencia que la capacidad del sistema no depende del recurso con mayor capacidad, sino del de menor capacidad efectiva.

Tabla 2. Capacidad y utilización por tipo de máquina (línea base vs. optimizada)

Recurso	Mbase	Mopt	Cbase	Uopt [%]	Estado
recta_n	1	2	77,84	62,31	Baja
overlock_504	1	1	145,45	66,69	Baja
overlock_504_r	1	1	123,08	78,81	Baja
overlock_514	2	3	65,31	99,02	Cuello
tapacostura	1	1	159,12	60,96	Baja
bastillado	2	3	70,07	92,28	OK
maquina_mh	1	1	109,09	88,92	OK
manual	2	2	117,55	82,52	Baja

3.1. Contraste de la hipótesis

La Tabla 3 resume el contraste. Respecto a la eficiencia, la línea optimizada elevó la utilización promedio de máquinas (87,82 % $\rightarrow$ 99,39 %), incrementó la producción por turno (+61,7 %) y redujo el tiempo de ciclo, cumpliendo $\mu E(M) > \mu E(0)$. Respecto al costo, el aumento de producción por turno (+61,7 %) superó proporcionalmente al incremento de personal (de 9 a 12 trabajadores, +33,3 %); en consecuencia la producción por trabajador-turno pasó de 73,3 a 88,9 prendas (+21,3 %), de modo que el costo horario del personal se distribuye en más prendas y el costo unitario de mano de obra disminuye, cumpliendo $\mu C(M) < \mu C(0)$. Al satisfacerse simultáneamente ambas condiciones, se rechaza H_0 y se acepta H_1 .

Tabla 3. Contrastación de la hipótesis a partir de la línea optimizada

Indicador	Sin modelo	Con modelo	Contraste
Utilización prom. [%]	87,82	99,39	$\mu E(M) > \mu E(0)$
Producción/turno	660	1067	+61,7%
Tiempo de ciclo [s]	60	37,11	Disminuye
Prod./trabajador-turno	73,3	88,9	$\mu C(M) < \mu C(0)$

4. Discusión

Los resultados confirman que el balance de línea no depende únicamente del tiempo total de confección de la prenda, sino de la distribución de las operaciones entre los distintos tipos de máquina y personal. El modelo permite identificar los recursos que concentran mayor carga de trabajo y aquellos con mayor holgura, orientando las acciones de mejora hacia el cuello de botella: incrementar la capacidad de recursos no críticos no eleva la producción total, mientras que intervenir el recurso limitante (en este caso la overlock 514) sí lo hace.

La principal contribución metodológica es el tránsito de una asignación empírica de recursos, basada en la experiencia, a una asignación cuantitativa sustentada en tiempos, eficiencia y capacidad. En coherencia con Mesa Grajales y Bedoya Vega (2009) y con Abtew et al. (2020), el enfoque cuantitativo permite explicitar el cuello de botella y dimensionar la línea con criterios técnicos. A diferencia de gran parte de la literatura, orientada a industrias de gran escala, el modelo se adapta a las condiciones de las MyPES y PyMES bolivianas e incorpora un análisis de stock de máquinas que verifica la factibilidad real de implementación

e identifica los faltantes por tipo de máquina, evitando que la optimización quede como un resultado puramente teórico.

Entre las limitaciones, el desempeño del modelo depende directamente de la calidad de los datos de entrada (tiempos estándar, secuencia operacional, eficiencia real y disponibilidad de máquinas). Además, la contrastación es de naturaleza determinística: compara la línea base con la línea optimizada generadas por el modelo, y la cuantificación monetaria exacta del costo unitario (en bolivianos por prenda) requiere los costos horarios reales del taller, que pueden incorporarse al módulo de costos en Python. Trabajos futuros pueden complementar el modelo con simulación de eventos discretos que incorpore la variabilidad de los tiempos, las fallas de máquina y los reprocesos, aproximando los resultados al comportamiento real de la línea.

Conclusiones

Se diseñó y validó un modelo de optimización de balance de línea que incrementa la eficiencia de producción de prendas y reduce los costos de ensamblaje en el sector textil boliviano, dando respuesta al objetivo, a la pregunta de investigación y a la hipótesis planteada. El modelo caracteriza el área de confección como un sistema de entradas, procesos y salidas; calcula las máquinas y el personal requeridos; identifica el cuello de botella; y genera tres escenarios de operación.

Para la prenda liviana analizada, la línea optimizada incrementó la producción de 60 a 97 prendas por hora y de 660 a 1067 por turno, elevó la utilización promedio de máquinas de 87,82 % a 99,39 % y redujo el tiempo de ciclo de 60 a 37,11 segundos por prenda, con tres máquinas adicionales y un aumento de personal de 9 a 12 trabajadores. El contraste de hipótesis confirmó de forma simultánea el aumento de la eficiencia y la reducción del costo unitario de mano de obra, por lo que se rechazó la hipótesis nula. La validación cruzada en GAMS y Python arrojó resultados coherentes, y el análisis de stock de máquinas demostró ser un componente necesario para asegurar la factibilidad de implementación. El modelo constituye, por tanto, una herramienta de apoyo confiable para la planificación de líneas de confección, cuyo desempeño depende de la calidad de los datos de entrada y cuya estructura permite extenderlo a otras prendas y condiciones productivas.

El autor agradece al personal técnico del área de confección por su colaboración en el estudio de tiempos y la validación de la secuencia operacional.

Referencias

- Abtew, M. A., Bongomin, O., Nganyi, E. O., Ocen, G. G., Musinguzi, A. y Omara, T. (2020). A complex garment assembly line balancing using simulation-based optimization. *Engineering Reports*, 2(9), e12258. <https://doi.org/10.1002/eng2.12258>
- Becker, C. y Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694–715. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023>
- Carvallo Munar, E. G. (2014). Propuesta de aplicación de conceptos de manufactura esbelta a una línea de producción de costura de una empresa de confecciones de tejido de punto para exportación. *Sinergia e Innovación*, 2(1), 51–88.
- Duque Roldán, M. I., Osorio Agudelo, J. A. y Agudelo Hernández, D. M. (2011). Los sistemas de costos basados en actividades (ABC): su aplicación en el sector de la confección. *Contaduría Universidad de Antioquia*, (58-59), 521–545.
- GAMS Development Corporation. (2023). *GAMS: General Algebraic Modeling System. User's guide*.
- Grieco, A., Caricato, P., Gianfreda, D., Pesce, M., Rigon, V., Tregnaghi, L. y Voglino, A. (2017). An industry 4.0 case study in fashion manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 11, 871–877. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.190>
- Heizer, J., Render, B. y Munson, C. (2017). *Principios de administración de operaciones* (11.ª ed.). Pearson Educación.
- Jiménez Aguilar, B. H. (2023). *Optimización de la producción de prendas textiles mediante la implementación de técnicas de manufactura esbelta en la empresa Creaciones Lizeth* [Tesis de grado, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería].
- Kanawaty, G. (Ed.). (1996). *Introducción al estudio del trabajo* (4.ª ed.). Oficina Internacional del Trabajo (OIT).
- Mesa Grajales, D. H. y Bedoya Vega, J. A. (2009). *Optimización en procesos y asignación de recursos en las empresas del sector confección a través del balanceo de líneas de producción*. Universidad Cooperativa de Colombia, sede Pereira.
- Niebel, B. W. y Freivalds, A. (2014). *Ingeniería industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo* (13.ª ed.). McGraw-Hill.

Ortiz Porras, J. et al. (2022). Diseño e implementación de modelos de optimización aplicados a la producción de prendas en el sector textil. *Revista Industrial*, 25(1), 103–135.

Ramesh Babu, V. (2012). *Industrial engineering in apparel production*. Woodhead Publishing India.

Taha, H. A. (2017). *Investigación de operaciones* (10.^a ed.). Pearson Educación.

Zhang, X., Wang, L. y Chen, Y. (2024). Balancing optimization of garment sewing assembly line based on genetic algorithm. *Journal of Textile Research*, 41(2), 125–129. <https://doi.org/10.13475/j.fzxb.20190104905>

Agradecimiento

El autor agradece al personal técnico del área de confección por su colaboración en el estudio de tiempos y la validación de la secuencia operacional.

Conflicto de interés

El autor de este manuscrito declara no tener ningún conflicto de interés.

Declaración ética

El autor declara que el proceso de investigación que dio lugar al presente manuscrito se desarrolló siguiendo criterios éticos, por lo que fueron empleadas en forma racional y profesional las herramientas tecnológicas asociadas a la generación del conocimiento.

Copyright

La **Revista Latinoamericana de Difusión Científica** declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

Licencia CreativeCommons

Esta obra está bajo una Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

