

Modelado y simulación de sistemas robóticos para operaciones de costura

Edwin Dore-Rivera, Máster en Dirección Empresarial^{1,2}, and Jose Luis Ordoñez-Avila, Doctor en Dirección Empresarial²

¹Universidad Autónoma de Honduras, Honduras, Edwin.dore@unitec.edu

²Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Honduras, jlordonez@unitec.edu

Resumen— Este trabajo evalúa la viabilidad técnica y económica de invertir en la automatización robótica de operaciones de costura industrial mediante el uso de simulación como herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Se modeló un sistema multirrobot basado en manipuladores SCARA en un entorno de simulación industrial, representando operaciones clave de costura como tapeta y hombro. El esquema de simulación permitió analizar trayectorias robóticas, sincronización de procesos y estabilidad del flujo productivo mediante el uso de buffers intermedios. A partir de los escenarios simulados se obtuvieron indicadores de desempeño productivo, tales como tiempo de ciclo y tasa de producción, los cuales fueron utilizados para evaluar el comportamiento operativo del sistema bajo condiciones controladas. Con base en estos resultados, se realizó un análisis financiero para estimar la viabilidad económica del sistema propuesto, considerando los costos de inversión y los beneficios asociados a la mejora de la productividad. Los resultados sugieren que la automatización robótica de operaciones de costura puede alcanzar flujos de producción estables y niveles de productividad competitivos, respaldando indicadores económicos favorables como el retorno de la inversión y el período de recuperación. En conjunto, el enfoque basado en simulación propuesto contribuye a reducir la incertidumbre en las decisiones de inversión previas a la implementación física del sistema.

Keywords— Industry 4.0, Robotics, Supply Chain, Apparel Industry, Simulation

I. INTRODUCCIÓN

La industria textil y de la confección se configura como uno de los sistemas productivos más complejos dentro de las cadenas globales de valor contemporáneas, debido a su elevada fragmentación geográfica, la articulación de redes multinivel de proveedores, la volatilidad de la demanda y la creciente presión por reducir tiempos de ciclo, costos logísticos y huella ambiental. En el caso de las empresas transnacionales, la logística y la gestión de la cadena de suministro han evolucionado desde un rol tradicionalmente operativo hacia una función estratégica, capaz de generar ventajas competitivas sostenibles mediante la integración, sincronización y resiliencia de los flujos físicos e informacionales [1].

La industria textil enfrenta presiones crecientes para mejorar su competitividad mediante la automatización de procesos intensivos en mano de obra, como las operaciones de costura. Sin embargo, la adopción de sistemas robóticos en este tipo de procesos implica decisiones de inversión con altos costos iniciales y riesgos operativos, particularmente debido a la manipulación de materiales deformables y a la necesidad de mantener flujos productivos estables. En este contexto, las empresas carecen de herramientas que les permitan evaluar, de

manera previa a la inversión, la viabilidad técnica y económica de incorporar robots industriales en operaciones de costura. La ausencia de evaluaciones cuantitativas basadas en simulación limita la capacidad de estimar productividad, estabilidad del proceso y retorno económico, incrementando la incertidumbre asociada a la toma de decisiones de inversión en automatización.

Durante las últimas décadas, la globalización productiva impulsó la deslocalización de procesos intensivos en mano de obra hacia economías emergentes, dando lugar a arquitecturas extendidas caracterizadas por largos lead times, elevados inventarios en tránsito y una creciente exposición a riesgos geopolíticos, sanitarios y climáticos. Sin embargo, la convergencia entre automatización avanzada, robótica, sistemas ciberfísicos y analítica de datos enmarcada en los principios de la Industria 4.0 está transformando estructuralmente dichos modelos, favoreciendo estrategias de nearshoring, regionalización y producción bajo demanda, con impactos directos sobre la configuración logística y la estructura de costos de las corporaciones multinacionales [2], [3]. Uno de los principales desafíos tecnológicos para la automatización integral del sector ha sido la naturaleza flexible, asimétrica y no lineal de los materiales textiles, que dificulta su manipulación, alineación y ensamblaje mediante sistemas robóticos convencionales.

La literatura especializada identifica los procesos de costura como puntos críticos, al concentrar aproximadamente el 40% del costo total de fabricación y cerca del 80% de las uniones estructurales de una prenda, condicionando tanto la eficiencia operativa como la confiabilidad de los tiempos de entrega [3]. Avances recientes en celdas de costura multirrobot con retroalimentación visual y control dinámico de tensión han demostrado la viabilidad de descomponer el proceso en subtarefas coordinadas de alimentación, posicionamiento y costura, logrando estabilidad y precisión incluso ante variaciones en las propiedades mecánicas del tejido [4], [5].

De forma complementaria, la calidad consistente de puntada, elementos esenciales para la estandarización y repetibilidad de procesos en entornos de producción transnacional [3]. Asimismo, el desarrollo de robótica suave y actuadores textiles autosensados introduce un nuevo paradigma al integrar funciones de actuación y censado directamente en estructuras costuradas, habilitando capacidades de adaptación morfológica, movimientos bioinspirados y control en lazo cerrado a bajo costo y alta escalabilidad [6], [7]. Estas innovaciones, junto con sistemas de visión artificial y dispositivos de manipulación flexible, contribuyen a reducir defectos, reprocesos y desperdicios,

fortaleciendo la estabilidad de los flujos logísticos y la confiabilidad del servicio al cliente [2], [8].

Desde una perspectiva de gestión estratégica de la cadena de suministro, la incorporación de estas tecnologías inteligentes genera efectos sistémicos relevantes: i) posibilita la relocalización de capacidades productivas más próximas a los mercados de consumo, reduciendo tiempos de entrega y emisiones; ii) habilita esquemas de personalización masiva y producción bajo demanda; y iii) incrementa la resiliencia frente a disrupciones al disminuir la dependencia de mano de obra altamente especializada y de proveedores geográficamente concentrados [1], [2]. Estos avances se articulan con los enfoques de integración de la cadena de suministro, manufactura esbelta-digital y capacidades dinámicas, al facilitar la reconfiguración ágil de recursos, la coordinación interorganizacional y la trazabilidad en tiempo real.

Tabla I.
Comparación conceptual de tecnologías de automatización

Tecnología	Contribución técnica	Impacto en procesos de costura
Celdas multirobot de costura	Control coordinado y retroalimentación visual (Schrimpf et al., 2015)[4]	Alineación precisa, reducción de arrugas y control de tensión
Control avanzado de trayectoria	Modelado no holonómico y escalamiento temporal (Tang et al., 2024)[3]	Sincronización robot-máquina y calidad consistente de puntada
Robótica suave y actuadores textiles	Estructuras cosidas autosensadas (Yilmaz et al., 2024; Guo et al., 2024)[6], [7]	Manipulación adaptable y control en lazo cerrado
Visión artificial y dedos blandos	Inspección y alimentación inteligente (Shen et al., 2025; Fontana et al., 2023)[2], [8]	Reducción de defectos y mejora de calidad en línea

La automatización flexible sustentada en robótica, visión artificial y actuadores inteligentes fortalece la planificación avanzada de capacidad, la sincronización producción-distribución y la reducción de la variabilidad operativa, considerados factores críticos para el desempeño logístico de empresas transnacionales del sector confección [3], [5]. La presente investigación tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica y económica de invertir en un sistema robótico para operaciones de costura mediante simulación industrial, analizando la productividad, estabilidad del flujo productivo y el impacto financiero asociado a su implementación.

Como contribución, este trabajo propone un enfoque basado en simulación robótica que permite apoyar la toma de decisiones de inversión en automatización de procesos de costura, integrando indicadores de desempeño productivo y análisis financiero en un entorno virtual previo a la implementación física.

II. MÉTODO

El presente trabajo adopta un enfoque de estudio de caso basado en simulación, con el objetivo de evaluar la factibilidad técnica de automatizar operaciones de costura plana en la confección de camisas mediante un robot tipo SCARA. En lugar de implementar un sistema físico, se emplea la simulación como herramienta de análisis preliminar, permitiendo estudiar el comportamiento del robot, el flujo operativo y las trayectorias de costura bajo condiciones controladas. Este enfoque reduce costos, evita riesgos asociados a la experimentación y facilita la comparación sistemática de diferentes configuraciones [9], [10].



Fig. 1 Representación de las tres operaciones de costura plana simuladas en Adept ACE. Las líneas discontinuas en azul indican las trayectorias de costura correspondientes a la tapeta frontal, el hombro y el bolsillo aplicado.

La simulación se desarrolla utilizando el software Adept ACE, que permite modelar estaciones robóticas industriales replicando el entorno de producción, el layout de la celda y la lógica del proceso. En el entorno virtual se construye una estación de costura plana que incluye el robot SCARA, una superficie de trabajo representativa de la prenda, y una máquina de costura fija. El modelo incorpora los parámetros cinemáticos del robot, los marcos de referencia y el punto central de herramienta (TCP), así como las trayectorias de costura definidas en el plano de trabajo, permitiendo analizar el movimiento del sistema de manera precisa y repetible.

Sobre este entorno simulado se evalúan tres operaciones representativas de confección, costura de tapeta frontal y sobrecostura de hombro— ejecutadas bajo distintos modos de operación. Para cada escenario, ACE registra métricas clave como tiempos de ciclo, longitud de trayectoria recorrida y continuidad del movimiento, proporcionando una base cuantitativa para la comparación entre alternativas. De esta

forma, la simulación no solo actúa como una herramienta de validación geométrica y operativa, sino también como un medio para estimar el desempeño productivo del sistema automatizado frente a prácticas tradicionales de costura manual. La Figura 1 muestra las costuras que se simularán en el software ACE.

Tabla II.
Elementos considerados para la simulación

Parámetro	Valor
Software	ACE / OMRON
Tipo de robot	SCARA
Operaciones simuladas	Tapeta, hombro
Tiempo simulado	300 s
Estrategia de flujo	Buffers intermedios
Velocidad de los robots	50%
Métrica principal	piezas/min

A. Simulación de costura de tapeta frontal

La primera simulación corresponde a la costura de la tapeta frontal de una camisa, una operación caracterizada por una trayectoria rectilínea longitudinal que requiere alta precisión en alineación y continuidad del movimiento. En el entorno de Adept ACE, la tapeta se modela como una línea de costura ubicada en el plano de trabajo, representativa del eje central frontal de la prenda. El robot SCARA ejecuta una secuencia de aproximación, costura y retirada, manteniendo una altura de trabajo constante durante la operación.

Esta simulación se utiliza como caso base, dado que la trayectoria recta permite evaluar el desempeño del sistema en condiciones de baja complejidad geométrica. Los parámetros principales considerados incluyen la velocidad de avance, el tiempo total de ciclo y la estabilidad del movimiento a lo largo de la trayectoria. El escenario resulta particularmente útil para analizar la capacidad del sistema automatizado de reproducir costuras largas y uniformes, típicas de procesos industriales de confección.

B. Simulación de sobrecostura de hombro

La segunda simulación analiza la sobrecostura de hombro, una operación que presenta una trayectoria curva suave y una longitud menor en comparación con la tapeta frontal. En Adept ACE, esta costura se representa mediante un spline definido en el plano XY, que conecta el panel frontal de la camisa con el canesú posterior, replicando la geometría típica del hombro.

Este escenario introduce una mayor exigencia dinámica al sistema, ya que el robot debe ajustar su velocidad y aceleración para seguir una trayectoria no lineal sin generar movimientos bruscos. La simulación permite evaluar el comportamiento del robot SCARA ante cambios de curvatura, así como la continuidad del movimiento durante la transición entre segmentos. La sobrecostura de hombro se considera

representativa de operaciones donde la estabilidad del material y el control del seguimiento geométrico son críticos.

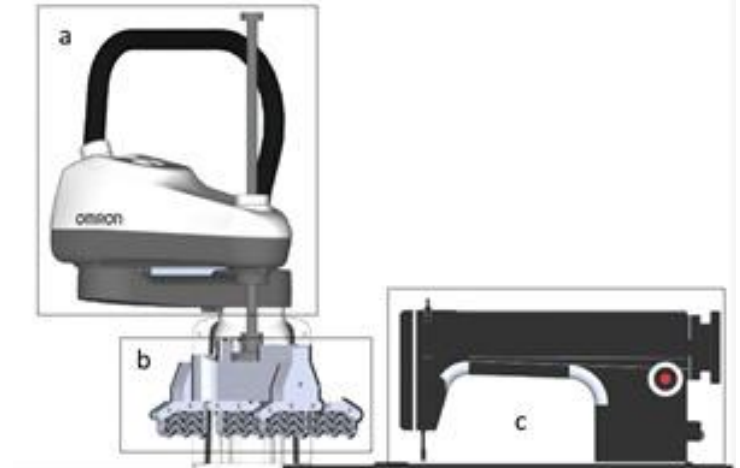


Fig. 2 Layout de simulación en Adept ACE.

C. Análisis financieros

El costo total patronal por operador fue estimado considerando salario base, cargas sociales, aguinaldo, décimo cuarto, vacaciones y provisiones por cesantía y preaviso. Estos componentes fueron calculados anualmente y proyectados en un horizonte de diez años utilizando una tasa de crecimiento salarial constante basados en la Tabla III.

Tabla III.
Desglose del costo anual total por operador

Concepto	Descripción	Cálculo aplicado
Salario base anual	Remuneración anual del operador	$S_t = S_0(1 + g)^t$
Cargas sociales	Aportes patronales obligatorios	$C_{sc} = \alpha * S$
Aguinaldo	Pago adicional anual equivalente a un mes de salario	$C_{ag} = S/12$
Décimo cuarto (14avo)	Pago adicional anual	$C_{14} = S/12$
Vacaciones	Remuneración correspondiente a días de descanso	$C_{vac} = \beta * S$
Cesantía + preaviso	Provisión anual por terminación laboral	$C_{cp} = Y * S$
Costo total patronal anual	Suma de todos los costos asociados al operador	$C_{op} = C_{sc} + C_{ag} + C_{14} + C_{vac} + C_{cp}$

Donde:

- S = salario anual del operador
- α = tasa de cargas sociales
- β = tasa equivalente por vacaciones
- Y = tasa de provisión por cesantía y preaviso
- S_t = salario anual en el año t
- S_0 = salario base inicial
- g = tasa de incremento salarial anual

A partir del costo laboral total, se estimó el ahorro anual generado por la sustitución de operadores mediante automatización robótica, el cual fue empleado para construir los flujos de caja del proyecto y evaluar su viabilidad económica mediante indicadores financieros como VAN, TIR, período de recuperación (Payback) y retorno sobre la inversión (ROI). Para esto se utilizó un Tasa de descuento del 14% con un horizonte de 10 años.

III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en Adept ACE, correspondientes a las tres operaciones de costura plana evaluadas. Los resultados se analizan en términos de productividad, tiempo de ciclo y estabilidad del proceso, con el objetivo de comparar el desempeño de las distintas trayectorias y modos de operación simulados. Asimismo, los valores obtenidos se contrastan con referencias de costura manual reportadas en la literatura, permitiendo evaluar el potencial de la automatización robótica como alternativa para mejorar la eficiencia y repetibilidad del proceso de confección.

A. Simulación de sobrecostura de hombro

En la Simulación 2, correspondiente a la costura de hombro, el proceso fue modelado en Adept ACE mediante una secuencia de tres etapas encadenadas utilizando buffers intermedios, con el fin de representar de manera controlada y determinista el flujo de la prenda durante la operación. En una primera etapa, el robot toma la pieza inicial (Part0) y la traslada a un primer estado intermedio (Part Buffer0), que representa la correcta alineación de los paneles frontal y posterior antes de la costura. Posteriormente, una segunda etapa desplaza la pieza desde Part Buffer0 hacia Part Buffer1, simulando el reposicionamiento necesario para seguir la trayectoria curva característica de la costura de hombro. Finalmente, en la tercera etapa, la pieza es transferida desde Part Buffer1 hasta el objetivo final (Part Target1), completando la operación de costura.

Esta configuración basada en buffers permite que cada etapa del proceso se active únicamente cuando la pieza alcanza el estado requerido, garantizando la ejecución secuencial correcta de la operación y evitando ambigüedades en el arranque de los procesos. Asimismo, el uso de múltiples buffers facilita la representación de ajustes intermedios propios de la costura de hombro, donde la geometría curva y la menor longitud de la trayectoria demandan mayor control del movimiento y de la orientación relativa de la prenda. De este modo, la simulación reproduce de forma más fiel las condiciones reales del proceso, permitiendo analizar el impacto del encadenamiento de movimientos sobre el tiempo de ciclo y la estabilidad del sistema.

La Figura 3 muestra la evolución acumulada del número de piezas procesadas durante la ejecución de la Simulación 2, correspondiente a la costura de hombro. El comportamiento

observado presenta un crecimiento progresivo y prácticamente lineal a lo largo del tiempo, lo que indica una ejecución estable y continua del proceso. Este patrón de crecimiento confirma que la configuración secuencial del proceso permite mantener una cadencia de operación consistente, aun cuando la complejidad geométrica de la costura de hombro es mayor en comparación con operaciones rectilíneas. En consecuencia, los resultados evidencian que el sistema simulado es capaz de sostener un desempeño productivo estable bajo condiciones de mayor exigencia cinemática.

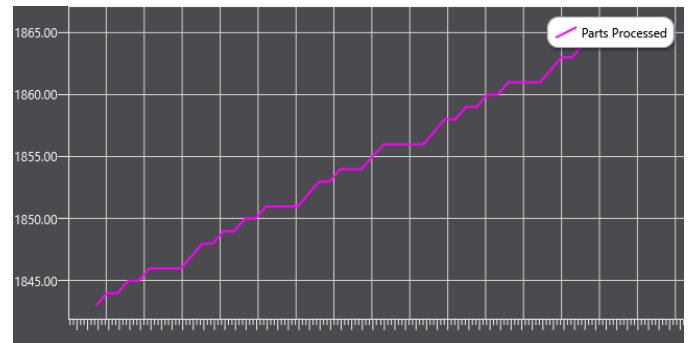


Fig. 3 Número acumulado de piezas procesadas durante la simulación 2 en Adept ACE.

La Figura 4 presenta la variación de la productividad instantánea, expresada en partes por minuto, durante la ejecución de la simulación de la costura de hombro. Se observa una ligera tendencia descendente a lo largo del tiempo, asociada principalmente a los ajustes dinámicos del robot al seguir una trayectoria curva y a los reposicionamientos intermedios modelados mediante buffers. A pesar de estas fluctuaciones, los valores se mantienen dentro de un rango estrecho, lo que indica un comportamiento estable del sistema y una cadencia de producción consistente durante toda la simulación.

Este comportamiento sugiere que la mayor complejidad geométrica de la costura de hombro introduce variaciones marginales en la productividad instantánea, sin comprometer de forma significativa el rendimiento global del proceso. En conjunto con la evolución acumulada de piezas procesadas, los resultados confirman la viabilidad de la configuración simulada para operaciones de costura con trayectorias no lineales.

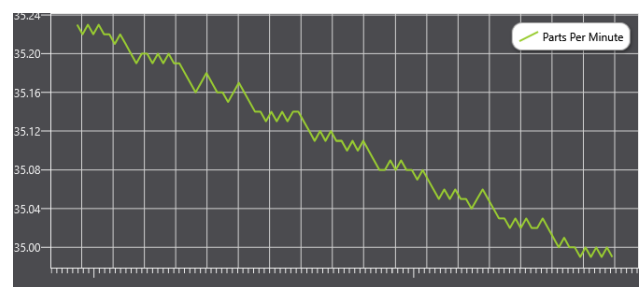


Fig. 4 Evolución de la productividad instantánea (partes por minuto) en la Simulación 2 correspondiente a la costura de hombro.

B. Simulación de costura de tapeta frontal con tres robots

La simulación de la costura de tapeta frontal se configuró en Adept ACE (fig. 5) mediante un sistema coordinado de tres robots industriales, donde la lógica de ejecución se define explícitamente a través del Process Manager utilizando partes (parts), buffers intermedios y objetivos (targets). Los robots de costura #1 y #2 se configuran de forma independiente, cada uno con una secuencia del tipo Part → Part Buffer → Part Target, lo que permite modelar de manera clara la finalización de cada etapa de costura y generar estados intermedios que representan la disponibilidad de la prenda una vez completada cada operación. Esta configuración asegura que ambas costuras se ejecuten de manera controlada y sin interferencias, manteniendo independencia funcional entre los dos robots.

El robot de producto terminado se configura para tomar la prenda únicamente a partir de los buffers finales generados por los robots de costura, actuando como un punto de convergencia del proceso. En el Process Manager, este robot se asocia a las parts provenientes de ambos buffers, de modo que su ejecución se habilita únicamente cuando las dos operaciones de costura han sido completadas. Esta lógica de configuración garantiza la sincronización efectiva entre procesos paralelos, evitando que el producto sea manipulado antes de que la tapeta haya sido completamente cosida por ambos robots de costura.

La coordinación global del sistema se basa, por tanto, en una configuración explícita de dependencias entre procesos, más que en el orden de ejecución listado. Al utilizar buffers como mecanismos de sincronización, la simulación reproduce un flujo determinista y reproducible, en el cual los robots de costura operan en paralelo y el robot de producto terminado integra los resultados de ambas estaciones. Esta estrategia de configuración permite evaluar de forma realista la viabilidad técnica de un sistema robótico colaborativo para la automatización de la costura de tapeta en un entorno industrial simulado.

La Figura 6 muestra la producción acumulada de los dos robots de costura durante la simulación, expresada como el número de targets procesados en función del tiempo. En ambos casos se observa un crecimiento prácticamente lineal, lo que indica un flujo de producción estable y continuo a lo largo del periodo analizado. Este comportamiento permite modelar la producción de cada robot mediante una ecuación lineal, donde la pendiente representa la tasa de producción del sistema.

La diferencia entre las pendientes de ambas curvas evidencia una ligera asimetría en las tasas de producción, atribuible a variaciones en la trayectoria de costura, tiempos de reposicionamiento o condiciones operativas específicas de cada robot. La estabilidad de ambas curvas confirma que el sistema mantiene una ejecución consistente, sin interrupciones ni pérdidas significativas de productividad, lo cual es fundamental para la coordinación posterior con el robot de producto terminado.

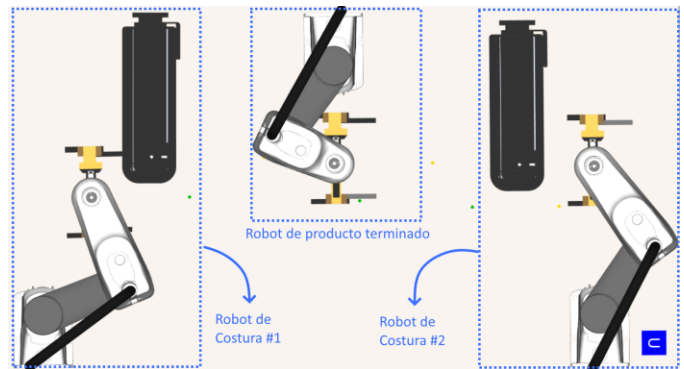


Fig. 5 Layout y configuración de la simulación de costura de tapeta frontal, mostrando la coordinación entre dos robots de costura y un robot de producto terminado mediante buffers intermedios en Adept ACE.

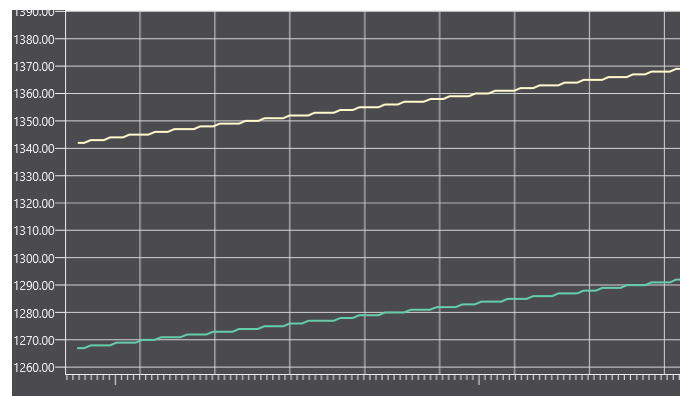


Fig.6 Producción acumulada de los dos robots de costura, expresada como número de targets procesados en función del tiempo durante la simulación.

A. Análisis financiero del modelo

Con el fin de complementar la evaluación técnica de la automatización robótica, se realizó un análisis financiero como se muestra en la tabla IV orientado a estimar la viabilidad económica de la implementación de tres robots industriales en sustitución de dos puestos laborales dedicados a operaciones de costura. Este análisis considera el ahorro anual generado por la reducción de costos de mano de obra, así como los costos recurrentes asociados al mantenimiento del sistema robótico. De esta manera, se busca determinar si las mejoras observadas en productividad y estabilidad del proceso se traducen en beneficios económicos sostenibles en el mediano y largo plazo.

El estudio financiero se estructura a partir de un flujo de caja proyectado a diez años, donde se incluyen la inversión inicial, los ahorros anuales por sustitución de operadores y los costos de mantenimiento de los robots. El flujo neto anual y el flujo acumulado permiten identificar el período de recuperación de la inversión y evaluar la evolución progresiva de los beneficios económicos derivados de la automatización. Este enfoque facilita una comparación objetiva entre el escenario automatizado y el esquema tradicional basado en mano de obra intensiva. Los resultados del análisis financiero

confirman la viabilidad económica de la automatización propuesta. El proyecto presenta un Valor Actual Neto (VAN) positivo de US\$ 9,497, lo que indica que la inversión genera valor a lo largo del horizonte de evaluación. Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) del 17.80% supera valores típicos de referencia para proyectos industriales, evidenciando una rentabilidad adecuada. El periodo de recuperación de la inversión se estima en 5.02 años, consistente con los ciclos de

vida esperados para sistemas robóticos industriales. Finalmente, el Retorno sobre la Inversión (ROI) del 98% refuerza que la sustitución de dos puestos laborales mediante tres robots constituye una alternativa económicamente viable, particularmente cuando se considera el impacto adicional en productividad, estabilidad del proceso y reducción de la dependencia de mano de obra.

Tabla IV Resumen análisis financiero

Año	Ahorro por 2 operadores (USD)	Mantenimiento 3 robots (USD)	Flujo neto anual (USD)	Flujo acumulado (USD)
0	0	-93,900.00	-93,900.00	-93,900.00
1	20,741.78	-4,500.00	16,241.78	-77,658.22
2	21,031.54	-4,500.00	16,531.54	-61,126.68
3	23,884.50	-4,500.00	19,384.50	-41,742.18
4	24,384.16	-4,500.00	19,884.16	-21,858.02
5	26,010.28	-4,500.00	21,510.28	-347.74
6	27,748.04	-4,500.00	23,248.04	22,900.30
7	29,605.12	-4,500.00	25,105.12	48,005.42
8	31,589.64	-4,500.00	27,089.64	75,095.06
9	33,710.36	-4,500.00	29,210.36	104,305.42
10	35,976.58	-4,500.00	31,476.58	135,782.00

IV. DISCUSIÓN

La discusión desarrollada pone en evidencia que la gestión de la cadena de suministro en el sector textil transnacional ha dejado de responder a una lógica tradicionalmente operativa para configurarse como un sistema estratégico multiescalar, en el que convergen decisiones tecnológicas, económicas e institucionales. En América Latina, y particularmente en Centroamérica, esta transformación se produce en un contexto caracterizado por asimetrías regionales en la captación de inversión extranjera directa, brechas persistentes en capital humano y una adopción aún incipiente de tecnologías digitales avanzadas, factores que condicionan directamente la competitividad global del sector [11].

A nivel micro-operativo, se muestra que la automatización de procesos críticos como la costura históricamente intensivos en trabajo manual y altamente variables contribuye de manera directa a mejorar la estabilidad de los tiempos de ciclo, la repetibilidad y la calidad del producto. Estas mejoras técnicas se traducen en una mayor confiabilidad logística, reducción de inventarios en tránsito y mayor capacidad de respuesta a esquemas de producción bajo demanda. Desde la perspectiva de las empresas transnacionales, estos efectos no solo optimizan la eficiencia interna, sino que habilitan decisiones estratégicas de relocalización productiva, como el nearshoring, al reducir la dependencia de mano de obra altamente especializada y acortar los lead times.

En el plano macroeconómico, los resultados evidencian que la inversión extranjera directa actúa como un mecanismo de competitividad exportadora únicamente cuando se articula con instituciones sólidas, políticas públicas coherentes y sistemas efectivos de formación de talento [12]. De lo contrario, la IED tiende a generar efectos heterogéneos entre países, intensificando la competencia regional por recursos y provocando desplazamientos de capacidades productivas sin impactos sostenidos en empleo de calidad o valor agregado local. Esta dinámica refuerza la idea de que la localización de operaciones transnacionales responde menos a incentivos aislados y más a la existencia de ecosistemas capaces de absorber, adaptar y escalar tecnologías avanzadas.

En un tercer nivel, la incorporación de tecnologías propias de la Industria 4.0 como IoT, blockchain, inteligencia artificial y sistemas avanzados de gestión logística emerge como un factor transversal que conecta las mejoras operativas con los resultados macroeconómicos. Estas tecnologías funcionan como habilitadores de visibilidad, trazabilidad, coordinación interorganizacional y sostenibilidad, pero su adopción en la región continúa limitada por marcos regulatorios incipientes, falta de especialización tecnológica e infraestructura digital insuficiente. En consecuencia, la automatización aislada o la digitalización parcial difícilmente generan ventajas competitivas sostenibles.

En síntesis, la discusión confirma que la competitividad y sostenibilidad de la cadena de suministro textil transnacional en América Latina dependen de la coherencia entre tres dimensiones interrelacionadas: la automatización flexible de procesos productivos clave, la alineación de la inversión y el

comercio exterior con políticas de desarrollo industrial y empleo, y la construcción de una gobernanza tecnológica que permita escalar soluciones digitales de manera estratégica. Desde esta perspectiva, la robótica de costura y la Industria 4.0 deben entenderse como capacidades dinámicas que, al integrarse con estrategias de nearshoring, formación técnica y sostenibilidad, redefinen simultáneamente la estructura de costos, la resiliencia operativa y el posicionamiento competitivo de las empresas transnacionales del sector.

Mediante indicadores clásicos como VAN, TIR y periodo de recuperación. En ambos casos, la simulación del sistema productivo sirve como base para estimar ahorros operativos y proyectar flujos de caja a mediano plazo. Asimismo, los dos estudios evidencian que la rentabilidad de la automatización no depende únicamente del desempeño técnico del robot, sino de su capacidad para sustituir costos recurrentes de mano de obra y mantener una operación estable, lo que refuerza la pertinencia de integrar análisis financiero y simulación en la evaluación de proyectos de automatización industrial.

IV. CONCLUSIÓN

La automatización flexible de procesos de confección constituye una capacidad dinámica clave para la reconfiguración competitiva de las cadenas de suministro textiles transnacionales en el marco de la Industria 4.0. Los resultados obtenidos mediante Adept ACE demuestran que la incorporación de celdas robóticas coordinadas, apoyadas en buffers intermedios y lógica determinista de sincronización, permite alcanzar flujos de producción estables, con crecimiento prácticamente lineal de la producción acumulada y variaciones acotadas en la productividad instantánea, incluso en trayectorias no lineales de mayor complejidad geométrica, como la costura de hombro. En este sentido, la robótica de costura no solo impacta a nivel micro-operativo, sino que habilita decisiones estratégicas de localización y nearshoring, al disminuir la dependencia de mano de obra altamente especializada y mitigar riesgos asociados a disrupciones laborales, sanitarias o geopolíticas. El análisis financiero complementario refuerza esta conclusión al evidenciar que, bajo supuestos realistas de inversión, mantenimiento y sustitución de puestos de trabajo, la automatización propuesta genera valor económico sostenible, reflejado en un VAN positivo, una TIR superior al costo de capital industrial y un periodo de recuperación compatible con el ciclo de vida de sistemas robóticos. La coherencia entre desempeño técnico, estabilidad productiva y rentabilidad confirma que la robótica aplicada a la costura puede trascender el nivel experimental para constituirse en una palanca estratégica de competitividad para corporaciones multinacionales del sector confección. El estudio concluye que la aplicación conjunta de robótica, simulación y mecanismos de sincronización en operaciones de costura mejora de forma medible la estabilidad del proceso, la previsibilidad de costos y la coordinación logística, aportando una base técnica y económica para decisiones de

automatización en cadenas de suministro textiles bajo un enfoque de Industria 4.0.

REFERENCIAS

- [1] S. Lee et al., «Implementation of an Automated Manufacturing Process for Smart Clothing: The Case Study of a Smart Sports Bra», *Processes*, vol. 9, n.o 2, p. 289, feb. 2021, doi: 10.3390/pr9020289.
- [2] J. Shen et al., «Autonomous Sewing Technology and System: A New Strategy by Integrating Soft Fingers and Machine Vision Technology», *Textiles*, vol. 5, n.o 4, oct. 2025, doi: 10.3390/textiles5040045.
- [3] A. M. Vasquez y J. L. Ordóñez-Avila, "Seven Degrees of Freedom Simulation Comparison for Industrial Process in San Pedro Sula, Honduras," in 2020 6th International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI 2020), New York, NY, USA, Nov. 2020, pp. 168–173, doi: 10.1145/3449301.3449330..
- [4] J. Schrimpf, M. Lind, y G. Mathisen, «Work Flow, Material Handling and Initial Part Positioning in a Multi-Robot Sewing Cell», *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, n.o 19, pp. 45-50, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.12.008.
- [5] N. Kosaka et al., «Control System Development for Automation of Curve Sewing Operations and Experimental Verification», *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, n.o 27, pp. 31-36, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.10.484.
- [6] A. F. Yilmaz et al., «Resistive Self-Sensing Controllable Fabric-Based Actuator: A Novel Approach to Creating Anisotropy», *Advanced Sensor Research*, vol. 3, n.o 7, p. 2300108, 2024, doi: 10.1002/adrs.202300108.
- [7] X. Guo et al., «Encoded sewing soft textile robots», *Sci. Adv.*, vol. 10, n.o 1, p. eadk3855, ene. 2024, doi: 10.1126/sciadv.adk3855.
- [8] E. Fontana et al., «Wrinkle-Free Sewing with Robotics: The Future of Soft Material Manufacturing», en *Biomimetic and Biohybrid Systems*, F. Meder, A. Hunt, L. Margheri, A. Mura, y B. Mazzolai, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 142-155. doi: 10.1007/978-3-031-38857-6_11.
- [9] J. L. Ordóñez-Avila, M. E. Perdomo, D. Aguilar, M. Ordóñez y M. Cardona, "Study Case: Robot Selection Based on Simulations and Financial Indicators," *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024)*, San José, Costa Rica, Jul. 17–19, 2024. [Online]. Available: https://laccei.org/LACCEI2024-CostaRica/full-papers/Contribution_1852_final_a.pdf
- [10] J. S. Maldonado y J. L. Ordóñez-Avila, "End Effector's productivity simulation test based on Honduran textile and food production processes," *Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering*, Boca Raton, Florida, USA, Jul. 18–22, 2022. [Online]. Available: https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/full_papers/FP700.pdf
- [11] E. Dore-Rivera, J. M. Saiz Álvarez, y J. L. Ordóñez-Ávila, «Supply Chains Technologies and Challenges in Latin America: A Bibliometric Review», en *Proceedings of the 23rd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI): «Engineering, Artificial Intelligence, and Sustainable Technologies in service of society»*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.1284.
- [12] E. Dore y J. L. Ordóñez-Avila, «Analysis of the unemployment rate and foreign investment index export mechanisms for the supply chain in the Central American textile sector», en *Proceedings of the 5th LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD 2025): «Entrepreneurship with Purpose: Social and Technological Innovation in the Age of AI»*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LEIRD2025.1.1.835.