



**PROPUESTA DE ADOPCIÓN GRADUAL Y ECONÓMICA DE TECNOLOGÍAS
DE LA INDUSTRIA 4.0 PARA OPTIMIZAR LOS PROCESOS PRODUCTIVOS EN
UNA PYME COLOMBIANA DE BORDADOS COMPUTARIZADOS**

INTEGRANTES
DANIEL CASTAÑEDA CHITO
ALEJANDRA VANESSA TORRES RODRIGUEZ
NICHOLAS STEVEN BERNAL BARRERA

PhD(c) Cristian Rincón Guio

Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano
Ingeniería Industrial
Bogotá D.C., Colombia

2025

ÍNDICE

1. RESUMEN DEL PROYECTO	4
ABSTRACT	5
TÍTULO DE LA PROPUESTA:	7
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:	7
Formulación del Problema	7
1.2 Pregunta de Investigación.	10
1.3 Objetivos	11
1.3.1 Objetivo General.	11
1.3.2 Objetivos Específicos.	11
1.4 Justificación	12
2. ESTADO DEL ARTE	16
2.1 Digitalización de bajo coste: Una puerta de entrada viable	16
2.2 Transformación digital como cambio cultural	17
2.3 Optimización de procesos y herramientas de bajo umbral tecnológico.	18
2.4 Relación con el contexto Colombiano.	19
3. MARCO TEÓRICO	20
3.1 Viabilidad técnica, económica y características de las PYMEs en Colombia	20
3.2 Ingeniería 4.0 y transformación digital: Fundamentos conceptuales.	21
3.3 Tecnologías clave para la transición digital.	22
3.4 Herramientas de ingeniería aplicadas a la transición digital.	23
3.5 Síntesis teórica: principios para la transformación digital en PYMEs colombianas.	25
1. Progresividad tecnológica como estrategia de entrada.	25
2. Cambio cultural como condición habilitante.	26
3. Optimización operativa como base técnica.	27
4. METODOLOGÍA	29
4.1 Enfoque y Diseño de Estudio.	29
4.2 Fases metodológicas	29
4.3 Población y Muestra.	32
4.4 Criterios de inclusión.	32
4.5 Criterios de exclusión.	33
4.6 Cronograma.	33
5. RESULTADOS	36
5.1 Introducción al diagnóstico.	36
5.1.1 Mapeo de procesos.	37
5.1.2 Análisis de tiempos (MTM)	40

5.1.3 Alimentación y recolección de producción.	41
5.1.4 Grabación del diseño en máquina y punto central.	42
5.1.5 Cambio de carreteles.	43
5.2 Indicadores de desempeño.	46
5.2.1 Análisis de variabilidad y tendencias operativas	48
1. Análisis estadístico de la eficiencia operativa	49
2. Tendencias clave identificadas	50
5.2.2 Comparación con benchmark del sector	51
5.2.3 Interpretación profunda de los resultados	53
5.2.3.1 Influencia del tipo de diseño en la eficiencia	54
5.2.3.2 Dinámica operativa y distribución del trabajo	54
5.2.3.3 Frecuencia y manejo de cambios	54
5.2.3.4 Limitaciones en la gestión del tiempo improductivo	54
5.2.3.5 Rentabilidad por hora trabajada	55
5.3 Evaluación de la factibilidad técnica y económica de adopción tecnológica.	56
5.3.1 Identificación de necesidades tecnológicas.	56
5.3.2 Evaluación de opciones tecnológicas.	57
5.3.3 Análisis económico simplificado.	59
5.3.3.1 Proyecciones económicas a mediano plazo	60
5.3.4 Selección de tecnologías recomendadas.	61
5.3.5 Conclusión y recomendaciones finales	62
5.4 Diseño de un roadmap de implementación tecnológica progresiva.	63
5.4.1 Fase 1 – Implementación inicial: Registro digital y visualización operativa.	64
Apéndice A. Estructura técnica de la matriz digital de producción. (Elaboración propia)	65
Apéndice B. Medición automatizada del proceso diario. (Elaboración propia)	66
Apéndice C. Reporte de producción semanal. (Elaboración propia)	67
Apéndice D. Cronograma semanal de producción (Elaboración propia).	70
5.4.2 Fase 2 – Optimización operativa y estandarización digital.	70
5.4.3 Fase final – Integración inteligente y automatización progresiva.	71
6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	75
REFERENCIAS	78
APÉNDICES	80
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	
Figura 1. EOIC (2024)	17
Figura 2. Tablas MTM -1 (MTM Ingenieros s.f.).	23
Figura 3. Proceso de decisión de innovaciones. (Rogers, 2003)	26

Figura 4. Diagrama metodológico. (Elaboración propia)	29
Figura 5. Diagrama general del proceso de producción en Bordatodo. (Elaboración propia)	33
Figura 6. Diagrama detallado de la etapa productiva. (Elaboración propia)	35
Figura 7. Dashboard. (Elaboración propia)	53

1. RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto aplicado se desarrolló en la empresa “Bordatodo”, una pyme colombiana del sector textil especializada en bordados computarizados, la cual presentaba deficiencias en la trazabilidad de procesos, la estandarización operativa y el acceso oportuno a información para la toma de decisiones. El objetivo fue diseñar una propuesta gradual y económica de adopción tecnológica basada en los principios de la Industria 4.0. Se utilizó una metodología mixta que combinó el análisis técnico-operativo con herramientas de ingeniería industrial, como el estudio de tiempos predeterminados MTM, el mapeo de procesos y entrevistas semiestructuradas, trabajando con una muestra de seis colaboradores. Los resultados evidenciaron una pérdida promedio del 42 % en tiempo operativo debido a registros manuales y falta de estandarización entre turnos. Como solución principal, se implementó un sistema digital en Microsoft Excel para registrar datos en tiempo real, visualizar indicadores clave y automatizar el cálculo de eficiencia, lo que permitió analizar el rendimiento operativo por operaciones en el transcurso de una semana. Como parte de la fase final del roadmap, se propuso la implementación de códigos QR como herramienta estratégica para mejorar la trazabilidad, seguimiento y automatización del proceso productivo. Esta solución, alineada con los principios de la Industria 4.0, permite la captura de datos en tiempo casi real, facilitando la toma de decisiones y promoviendo la escalabilidad tecnológica futura. Esta propuesta demuestra que, mediante soluciones asequibles, es posible modernizar de manera

escalonada los procesos de PYMEs textiles, mejorando su eficiencia, trazabilidad y capacidad de respuesta.

Palabras clave: Industria 4.0, bordado computarizado, MTM, trazabilidad textil, eficiencia operativa.

ABSTRACT

This applied project was developed at "Bordatodo", a Colombian SME in the textile sector specialized in computerized embroidery, which exhibited deficiencies in process traceability, operational standardization, and timely access to information for decision-making. The objective was to design a gradual and low-cost technological adoption proposal based on Industry 4.0 principles. A mixed-methods approach was employed, combining technical-operational analysis with industrial engineering tools such as Methods-Time Measurement (MTM), process mapping, and semi-structured interviews, working with a sample of six collaborators. The results revealed an average loss of 42% in operational time due to manual recordkeeping and lack of shift standardization. As a primary solution, a digital system in Microsoft Excel was implemented to record real-time data, visualize key performance indicators, and automate the calculation of efficiency, enabling analysis of operational performance throughout a full production week. In the final phase of the proposed roadmap, the implementation of QR codes was suggested as a strategic tool to enhance traceability, tracking, and automation of the production process. This solution, aligned with Industry 4.0 principles, enables near real-time data capture, facilitates agile decision-making, and supports future technological scalability. This proposal demonstrates that through accessible and scalable tools, it is possible to modernize production processes in textile SMEs, improving their efficiency, traceability, and responsiveness to operational demands in a sustainable and progressive manner.

Keywords: Industry 4.0, textile manufacturing, digital transformation, MTM, process traceability, computerized embroidery, SME optimization.

TÍTULO DE LA PROPUESTA:

Propuesta de adopción gradual y económica de tecnologías de la Industria 4.0 para optimizar los procesos productivos en una PYME colombiana de bordados computarizados.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

Formulación del Problema

La cuarta revolución industrial ha marcado un punto de inflexión en la forma en que las organizaciones producen, gestionan y entregan valor, haciendo de la digitalización y la automatización elementos esenciales para la competitividad empresarial. Sin embargo, en Colombia, las pequeñas y medianas empresas (PYMEs) manufactureras enfrentan serias dificultades para adoptar estos nuevos enfoques, lo que las pone en desventaja frente a empresas más grandes o con mayores capacidades tecnológicas.

A pesar del creciente interés en la modernización tecnológica reflejado en encuestas como la EOIC (ANDI, 2024), la transformación digital aún no ocupa un lugar prioritario en las inversiones de la mayoría de las PYMEs. La falta de recursos financieros, identificada como el principal obstáculo (Mecking, 2024), limita la posibilidad de incorporar tecnologías avanzadas como sistemas automatizados o inteligencia artificial. Esto se traduce en procesos operativos ineficientes, poca capacidad de monitoreo en tiempo real, dificultades en la toma de decisiones y una baja capacidad de respuesta ante las exigencias del mercado.

Las PYMEs manufactureras enfrentan una profunda limitación en capacidades digitales y operativas que compromete su sostenibilidad y competitividad en el contexto actual. Esta

limitación no solo es de tipo financiero, sino también estructural y cultural: muchas organizaciones carecen de planes estratégicos de transformación digital, sistemas de gestión basados en datos o procesos estandarizados que faciliten la mejora continua. De acuerdo con el estudio Latin American Digital Transformation Index (Siemens, 2022), el 75% de las PYMEs en América Latina se encuentran en una etapa temprana de adopción digital, y la mayoría presenta una baja integración de tecnologías habilitadoras como IoT, automatización o analítica de datos. Esta situación repercute directamente en su productividad y capacidad de innovación, reduciendo su potencial de crecimiento en el mediano y largo plazo.

En este contexto, muchas PYMEs colombianas del sector manufacturero textil reflejan con claridad estas dificultades estructurales, como es el caso de Bordatodo, una empresa dedicada a la maquila de bordados computarizados, ubicada en Colombia. Esta empresa produce un promedio de 7.800 unidades mensuales en turnos de 26 días hábiles, utilizando dos máquinas bordadoras una de ocho cabezotes y otra de cuatro. Los tiempos de producción varían significativamente según la complejidad del diseño: en una hora se pueden bordar 100 unidades de 1.000 puntadas, mientras que bordados de mayor densidad (10.000 puntadas) solo permiten una producción de 40 unidades por hora.

A pesar del esfuerzo operativo, la empresa enfrenta varias barreras que afectan directamente su eficiencia productiva y su competitividad. No existen registros sistemáticos de producción ni mecanismos de control que permitan monitorear el desempeño de los operarios o identificar reprocesos, lo que dificulta la evaluación precisa de costos. Esta situación se traduce en pérdidas económicas concretas: por ejemplo, en múltiples ocasiones se han producido bordados con colores distintos a los aprobados por el cliente debido a fallas en la comunicación entre el área operativa y los responsables del diseño, lo que ha obligado a la

empresa a asumir el costo total de la prenda y realizar el reproceso completo del bordado. Cada uno de estos errores puede representar una pérdida estimada de COP \$1 millón, sin incluir aún el costo del hilo, el papel (interlón), ni la mano de obra implicada, que también deberían considerarse como pérdidas operativas. Si bien no se tiene un consolidado exacto, este tipo de errores que ocurren con cierta frecuencia podrían representar pérdidas acumuladas superiores a los COP \$3 millones mensuales. Esto resalta la urgencia de adoptar herramientas que permitan mejorar la trazabilidad, el control y la comunicación dentro de los procesos productivos.

A nivel nacional, algunas empresas del sector han comenzado a responder a estos desafíos mediante la adopción de herramientas de la Industria 4.0. Un caso representativo es Supertex Group, ubicada en Yumbo, la cual ha implementado un sistema de software para el control de producción en su área de bordado. Esta estrategia ha permitido una mayor trazabilidad, reducción de tiempos improductivos y mejoras en la toma de decisiones operativas, logrando hasta un 10% de mejora en su eficiencia general. Esta experiencia evidencia que, incluso en entornos similares, la transformación digital gradual es factible y genera resultados positivos en términos de eficiencia y rentabilidad.

No abordar esta problemática implica un riesgo significativo de rezago tecnológico, lo que puede derivar en una pérdida progresiva de competitividad frente a empresas más digitalizadas. La limitada incorporación de tecnologías propias de la Industria 4.0 afecta directamente la eficiencia, eficacia y capacidad de mejora organizativa de las PYMEs, comprometiendo su sostenibilidad. Según García Sánchez (2022), las tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial, como los sistemas inteligentes y las TIC, pueden desempeñar un papel clave en el crecimiento organizacional, la optimización de recursos y el

perfeccionamiento de los procesos productivos, por lo que su adopción debe ser vista como una estrategia esencial y no como un lujo.

En síntesis, los principales desafíos productivos de empresas como Bordatodo incluyen la falta de recursos financieros, la baja digitalización de procesos, la limitada estandarización operativa y la ausencia de una cultura de mejora continua, lo cual las deja mal posicionadas frente a los estándares de la Industria 4.0. Por ello, este proyecto plantea el diseño de una propuesta de implementación progresiva de tecnologías asociadas a la Industria 4.0, como el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), el análisis de datos y el Estudio de Tiempos Predeterminados (MTM), con el fin de optimizar sus procesos productivos sin incurrir en inversiones excesivas. Esta propuesta busca sentar las bases para una transformación digital gradual, adaptada a las condiciones reales de la empresa, que permita mejorar su eficiencia operativa, su capacidad de respuesta al mercado y su sostenibilidad a largo plazo.

1.2 Pregunta de Investigación.

¿Qué tecnologías de la Industria 4.0 pueden ser implementadas progresivamente y a bajo costo en una empresa colombiana dedicada a los bordados computarizados para mejorar su productividad, y bajo qué criterios técnico-económicos se debe priorizar su adopción?

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo General.*

Diseñar una propuesta de implementación progresiva de tecnologías de la Industria 4.0 en una empresa colombiana del sector de bordados computarizados, con base en un análisis técnico, operativo y estratégico de sus procesos, con el fin de mejorar su eficiencia, productividad y sostenibilidad.

1.3.2 *Objetivos Específicos.*

1. Realizar un diagnóstico integral de los procesos actuales de la empresa de bordados computarizados, mediante técnicas de mapeo de procesos, medición del trabajo, como MTM y detección de cuellos de botella.
2. Identificar oportunidades de mejora en la productividad estableciendo líneas base de indicadores clave de desempeño (KPIs) como tiempos de ciclo, eficiencia operativa y costos.
3. Evaluar la factibilidad técnica y económica de la adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 como automatización, IoT, análisis de datos y conectividad en función de las necesidades específicas de la empresa.
4. Diseñar un roadmap de implementación tecnológica progresiva adaptado a la empresa, que incluya fases de adopción, estimaciones de inversión, requerimientos técnicos y un sistema de monitoreo del impacto sobre los procesos y los indicadores clave.

1.4 Justificación

Este trabajo de investigación surge de la necesidad de responder al desafío que enfrentan muchas pequeñas y medianas empresas (PYMEs) colombianas frente a la cuarta revolución industrial. Estas empresas, que representan un componente clave del desarrollo económico y social del país, deben adaptarse a un entorno global marcado por la transformación digital, la automatización y la integración de tecnologías emergentes. Sin embargo, factores como la limitación de recursos, la baja estandarización operativa y la escasa cultura de innovación dificultan la adopción efectiva de herramientas asociadas a la Industria 4.0.

Desde una perspectiva teórica, este estudio aporta al conocimiento sobre cómo tecnologías como la automatización, el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial y el análisis de datos pueden aplicarse en entornos de producción tradicionales. Se apoya en marcos conceptuales relacionados con la transformación digital, la gestión del cambio y la innovación tecnológica, para comprender cómo estas herramientas pueden mejorar la eficiencia, productividad y sostenibilidad de las PYMEs manufactureras.

En línea con un enfoque práctico, la investigación se centra en el caso de una microempresa colombiana dedicada a la maquila de bordados computarizados, que presenta características comunes en el sector: bajos niveles de automatización, procesos manuales intensivos, y escasa incorporación de tecnologías digitales. A través de esta empresa, se aplican herramientas de análisis como el Estudio de Tiempos Predeterminados (MTM) para identificar ineficiencias operativas y evaluar el impacto potencial de una adopción tecnológica progresiva. Esta aproximación permite no solo validar la viabilidad técnica y

económica de la transformación digital, sino también construir un roadmap de implementación adaptado a sus capacidades reales.

Desde una perspectiva económica, este estudio cobra mayor relevancia al identificar que, en la empresa objeto de análisis, se producen en promedio dos errores mensuales por reprocesos vinculados a bordados con colores incorrectos u otros detalles mal gestionados, con un costo estimado por evento de COP \$600.000. Esto representa una pérdida directa de al menos COP \$1.200.000 mensuales, sin considerar los materiales, el papel interlón ni la mano de obra adicional invertida, lo que podría elevar las pérdidas reales por reprocesos a más de COP \$3 millones mensuales, especialmente si se tiene en cuenta que hasta un 10% de la producción puede requerir correcciones. En este contexto, la adopción gradual de herramientas de control y digitalización permitiría reducir significativamente estos errores y optimizar recursos clave, representando un potencial ahorro económico relevante y sostenible. Tomando como referencia el caso de la empresa Supertex Group, ubicada en Yumbo, que alcanzó una mejora de hasta un 10% en eficiencia operativa tras implementar un software de control de producción, se puede estimar que una reducción proporcional de ineficiencias en Bordatodo podría recuperar mensualmente más de un millón de pesos, y generar ahorros anuales cercanos o superiores a los COP \$12-15 millones, dependiendo del grado de integración tecnológica.

El valor de este estudio radica también en su originalidad como propuesta innovadora orientada a microempresas del sector textil, que históricamente han estado rezagadas en términos de digitalización. La propuesta plantea un modelo de adopción gradual y económica de tecnologías asociadas a la Industria 4.0, diseñado para ajustarse a contextos con recursos limitados y bajo nivel de madurez tecnológica. A diferencia de los modelos convencionales

que promueven inversiones elevadas y soluciones complejas, este proyecto apuesta por herramientas asequibles, combinando análisis de tiempos, automatización progresiva e integración de IoT básico, con un enfoque modular que permite escalar según las posibilidades reales de la empresa. Este enfoque no solo facilita la apropiación tecnológica de forma realista, sino que también favorece la sostenibilidad operativa y organizacional en el mediano y largo plazo.

Del mismo modo, la propuesta posee un alto potencial de aplicación extensiva, ya que aborda problemáticas comunes a muchas micro y pequeñas empresas manufactureras, tanto en el sector textil como en otros rubros productivos del país. La falta de control de procesos, la ausencia de indicadores de eficiencia, y la dependencia de la experiencia operativa sin apoyo digital son situaciones frecuentes en este tipo de organizaciones. En ese sentido, el modelo planteado puede ser adaptado como guía para empresas similares en regiones con condiciones tecnológicas y financieras limitadas, promoviendo procesos de mejora continua a través de recursos accesibles. Además, sus resultados pueden alimentar iniciativas públicas o privadas de apoyo a la digitalización empresarial, así como servir de referencia para instituciones educativas interesadas en formar talento humano preparado para liderar la transformación digital en entornos de producción tradicionales.

Aunque no pretende generalizar sus resultados, este estudio de caso permite ilustrar con claridad los beneficios y desafíos de implementar tecnologías emergentes en una empresa real, y propone soluciones prácticas basadas en evidencia, alineadas con las necesidades y posibilidades del sector manufacturero colombiano.

2. ESTADO DEL ARTE

La Cuarta Revolución Industrial ha provocado transformaciones significativas en la forma en que las organizaciones producen, gestionan y compiten a nivel global. No obstante, en países en desarrollo como Colombia, las pequeñas y medianas empresas (PYMEs) enfrentan dificultades estructurales que limitan su capacidad para adoptar nuevas tecnologías. Este apartado presenta una revisión crítica de la literatura reciente sobre estrategias viables de implementación tecnológica en PYMEs, con énfasis en enfoques progresivos y adaptativos para contextos de baja madurez digital.

2.1 Digitalización de bajo coste: Una puerta de entrada viable

Uno de los enfoques más relevantes para las PYMEs en economías emergentes es la digitalización de bajo coste. Investigaciones como la de Telukdarie et al. (2023) han demostrado, a partir del análisis de 200 PYMEs sudafricanas, la utilidad de identificar funciones empresariales prioritarias como base para la implementación progresiva de tecnologías digitales. Estos hallazgos son extrapolables al contexto colombiano, donde la restricción presupuestaria continúa siendo una de las principales barreras para la transformación digital (ANDI, 2017).

En la misma línea, McFarlane et al. (2022) proponen un marco que permite priorizar las necesidades digitales mediante un diseño simple y centrado en el usuario. Este marco fue aplicado en la iniciativa británica *Digital Manufacturing on a Shoestring*, que utiliza talleres participativos para guiar el desarrollo de soluciones ajustadas a los recursos disponible. Investigaciones posteriores, (McFarlane et al., 2024) refuerzan la importancia de soluciones intuitivas y diseñadas desde la perspectiva del usuario.

La relevancia de estos modelos radica en su escalabilidad y bajo umbral técnico, elementos cruciales para las micro y pequeñas empresas colombianas, en las que más del 44% identifican restricciones financieras como un obstáculo para avanzar tecnológicamente como se logra apreciar en la Figura 1 donde se presenta una encuesta realizada a las empresas del país.



Figura 1. EOIC (2024)

2.2 Transformación digital como cambio cultural

Además de los factores técnicos y financieros, los estudios recientes resaltan la dimensión organizacional como un aspecto crítico. La transformación digital no puede reducirse a la adquisición de tecnología; implica una adaptación progresiva de las prácticas, estructuras y culturas de las empresas.

La evidencia empírica sugiere que la resistencia al cambio es una constante en las PYMEs de países emergentes. En Colombia, por ejemplo, el 74.1 % de las empresas encuestadas por la ANDI (2017) identifican la falta de cultura organizacional orientada a la innovación como la principal barrera para avanzar hacia modelos más digitalizados. Por tanto, las iniciativas

tecnológicas deben ir acompañadas de procesos de formación, liderazgo interno y apropiación del cambio.

Además, estudios como el de Norma ETT et al. (2016) evidencian beneficios que la digitalización puede traer consigo beneficios como la optimización de la cadena de suministro, reducción de costos energéticos y mayor rentabilidad. Sin embargo, estos beneficios sólo pueden alcanzarse cuando hay disposición organizacional para reestructurar la lógica tradicional del negocio.

2.3 Optimización de procesos y herramientas de bajo umbral tecnológico.

En contextos con baja madurez digital, la literatura enfatiza la importancia de iniciar el proceso de transformación con acciones de mejora operativa que no dependan de tecnología avanzada. Patel (2015), mediante estudios de tiempos con cronómetro, demostró que pequeñas mejoras en los tiempos de ciclo pueden generar impactos significativos en la eficiencia productiva.

Por su parte, Yazdi et al. (2018, 2019) sostienen que el tiempo de inactividad es un factor crítico que afecta el rendimiento del sistema, y que su minimización puede lograrse mediante análisis detallados y simulaciones del flujo de trabajo. Estas soluciones no requieren una infraestructura tecnológica avanzada, lo cual las convierte en opciones factibles para muchas PYMEs colombianas que aún operan entre los niveles de madurez de la Industria 2.0 y 3.0.

Asimismo, Maksimov y Kalkis (2016, 2018) y Tramboulidis et al. (2019) han explorado el uso de sensores e IoT para medir tiempos de operación y mejorar condiciones ergonómicas.

Aunque estas tecnologías requieren un nivel mayor de digitalización, pueden ser introducidas de manera progresiva, comenzando por procesos clave.

2.4 Relación con el contexto Colombiano.

La revisión de la literatura permite identificar tres elementos clave que deben guiar cualquier iniciativa de transformación digital progresiva en las PYMEs colombianas:

1. **Progresividad y pertinencia contextual:** Las estrategias deben diseñarse con base al nivel de madurez digital de cada empresa, priorizando herramientas accesibles y con retorno de inversión claro (McFarlane et al., 2024; Telukdarie et al., 2023).
2. **Cambio cultural como fundamento de la transformación:** El éxito de la adopción tecnológica está condicionado por factores internos como la cultura, el liderazgo y la disposición al cambio (ANDI, 2017)
3. **Optimización como punto de partida:** La mejora de procesos mediante herramientas simples, como los estudios de tiempos y simulaciones básicas, puede ofrecer resultados rápidos y medibles que justifiquen futuras inversiones (Yazdi et al., 2019; Patel, 2015).

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Viabilidad técnica, económica y características de las PYMEs en Colombia

Las pequeñas y medianas empresas (PYMEs) representan el 99,5 % del tejido empresarial colombiano y generan una porción significativa del empleo formal y la producción nacional (BBVA, 2024). Esta elevada participación las convierte en actores clave para la modernización productiva del país. Sin embargo, la adopción tecnológica en este segmento empresarial enfrenta obstáculos persistentes: restricciones financieras, bajo acceso a formación técnica, limitada infraestructura digital, y debilidades en la cultura organizacional orientada a la innovación (ANDI, 2017).

Desde el punto de vista técnico, las PYMEs muestran una gran heterogeneidad operativa. Según el Decreto 957 de 2019, las microempresas tienen hasta 10 empleados, las pequeñas entre 11 y 50, y las medianas entre 51 y 200. Esta diversidad impone la necesidad de soluciones tecnológicas ajustadas al tamaño, capacidades humanas y recursos de cada empresa. En este sentido, cobra importancia la implementación de estrategias progresivas, accesibles y con retorno visible que hagan viable la transformación digital sin comprometer la sostenibilidad económica.

En términos de viabilidad financiera, resulta pertinente incorporar herramientas que permitan valorar objetivamente el impacto de la adopción tecnológica. Una de las más relevantes en el contexto de las PYMEs es el Retorno sobre la Inversión (ROI), que permite calcular el beneficio obtenido en relación con los recursos invertidos. Su uso contribuye a priorizar iniciativas que generen valor tangible, especialmente cuando se busca demostrar resultados en plazos cortos y con recursos limitados.

Además, el proceso de incorporación tecnológica en las PYMEs puede entenderse desde el enfoque de difusión de innovaciones de Rogers (2003), quien plantea que la adopción tecnológica ocurre a través de cinco etapas: conocimiento, persuasión, decisión, implementación y confirmación. Este proceso está influenciado por variables como las características del adoptante, los canales de comunicación, el tipo de innovación y el entorno. En este sentido, la transferencia tecnológica en las PYMEs no es un evento aislado, sino un proceso de aprendizaje organizacional progresivo que depende de la capacidad interna para absorber y adaptar las innovaciones a contextos reales de operación.

3.2 Ingeniería 4.0 y transformación digital: Fundamentos conceptuales.

La Industria 4.0 se define como la integración de tecnologías digitales avanzadas en los sistemas de producción y gestión empresarial, con el objetivo de crear entornos interconectados, adaptativos y centrados en la eficiencia inteligente. Estas tecnologías incluyen el Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial (IA), automatización avanzada, robótica colaborativa, análisis de datos, realidad aumentada y sistemas ciberfísicos (Turgeon, 2019; Benítez, 2022).

La transformación digital, por su parte, debe entenderse más allá de una simple modernización tecnológica. Implica un cambio estructural en la forma en que las organizaciones generan valor, toman decisiones y se relacionan con su entorno. Según Dilber Ulas et al. (2019), la digitalización no es un salto abrupto, sino una adaptación progresiva de los ecosistemas institucionales y operativos a nuevas lógicas organizativas impulsadas por la tecnología.

Este proceso de transformación tiene sus raíces en la evolución histórica de la industria, desde la mecanización inicial hasta la digitalización inteligente actual. La Tabla 1 resume las características clave de cada etapa industrial y permite contextualizar la Industria 4.0 como la continuación lógica de una cadena de revoluciones tecnológicas.

Revolución Industrial	Tecnología principal	Características clave
Industria 1.0	Máquinas a vapor, energía hidráulica	Mecanización de procesos, transición del trabajo manual
Industria 2.0	Electricidad, línea de ensamblaje	Producción en masa, eficiencia operativa
Industria 3.0	Electrónica, informática, automatización	Automatización parcial, uso de software en procesos
Industria 4.0	IoT, Big Data, IA, robótica, ciberfísica	Digitalización total, toma de decisiones en tiempo real

Tabla 1. Las cuatro etapas de la revolución industrial - Kagermann et al. (2013)

En este contexto, la transformación digital en PYMEs debe abordarse como un proceso gradual y adaptado a sus capacidades. La implementación de tecnologías debe partir de un diagnóstico técnico y operativo, priorizando soluciones de bajo costo que generen valor desde etapas tempranas.

3.3 Tecnologías clave para la transición digital.

Entre las tecnologías fundamentales para la transformación se encuentra el Internet de las Cosas (IoT), que permite la recolección y transmisión de datos desde los procesos productivos mediante sensores y dispositivos interconectados. Este flujo de datos habilita el monitoreo remoto, el mantenimiento predictivo y la trazabilidad, incrementando la eficiencia y reduciendo tiempos improductivos.

En el contexto colombiano, Parra et al. (2021) destacan que la adopción del IoT en PYMEs está directamente relacionada con su preparación tecnológica: infraestructura básica, conectividad, y una cultura abierta al cambio. Por ello, se recomienda una implementación escalonada, priorizando procesos críticos y de bajo costo, como el control de tiempos o el monitoreo de condiciones de operación.

3.4 Herramientas de ingeniería aplicadas a la transición digital.

Para avanzar hacia una digitalización efectiva, las PYMEs deben primero optimizar sus procesos actuales. La ingeniería industrial proporciona herramientas fundamentales para este propósito. El Método de Tiempos Predeterminados (MTM), por ejemplo, permite descomponer las tareas en movimientos básicos y asignar tiempos estándar, identificando ineficiencias y proponiendo rediseños más efectivos (Coli, 2019). Este enfoque resulta especialmente útil en entornos con alta participación de trabajo manual, ya que facilita la estandarización operativa previa a la adopción tecnológica. La Figura 2 ilustra algunos de los movimientos manuales básicos que analiza el MTM, como alcanzar, tomar, mover, colocar o soltar, los cuales permiten establecer una base objetiva para el análisis del desempeño operativo y la mejora continua.

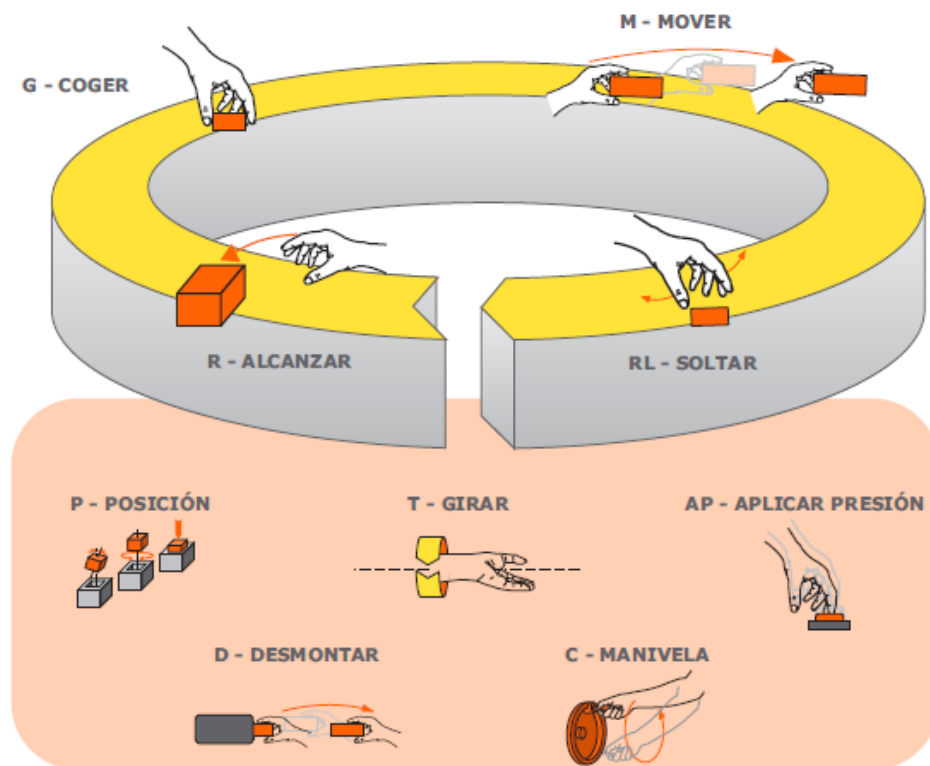


Figura 2. Tablas MTM -1 (MTM Ingenieros s.f.).

En ambientes de baja automatización, como los que caracterizan a muchas microempresas manufactureras colombianas, el MTM se plantea como una herramienta especialmente útil para analizar y estandarizar operaciones manuales, excluyendo el tiempo máquina. Su aplicación permite estructurar instrumentos como matrices digitales de recolección de datos de producción, que faciliten el seguimiento de variables como eficiencia operativa, tiempo de ocupación y tasa de producción. Además, al integrarse con TIC básicas, como hojas de cálculo automatizadas, esta metodología no solo permite establecer tiempos estándar, sino también mantener una visión cuantitativa del desempeño productivo, lo que la convierte en un recurso clave para procesos de mejora continua y toma de decisiones basadas en datos.

El uso de estudios de métodos y tiempos posibilita el cálculo de indicadores clave de desempeño como:

- Tiempo de ciclo: duración promedio del proceso productivo.
- Eficiencia del trabajo: comparación entre el tiempo estándar y el tiempo real.
- OEE (Eficacia Global del Equipo): integra disponibilidad, rendimiento y calidad.
- Proporción de tiempo de valor agregado vs. tiempo improductivo.

Estos indicadores permiten tomar decisiones basadas en evidencia cuantitativa sobre dónde y cómo intervenir, con qué tecnología, y en qué momento, sentando las bases para una transformación digital eficaz y sostenible.

3.5 Síntesis teórica: principios para la transformación digital en PYMEs colombianas.

A partir del análisis conceptual y los hallazgos del estado del arte, se consolidan tres principios estratégicos que deben guiar la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 en PYMEs colombianas, particularmente en aquellas con recursos limitados y baja madurez digital. Estos principios se articulan con modelos clásicos y enfoques contemporáneos que permiten una comprensión integrada de los factores técnicos, organizacionales y humanos que condicionan la transformación digital.

1. Progresividad tecnológica como estrategia de entrada.

La transformación digital debe abordarse de forma progresiva, iniciando con soluciones de bajo costo y complejidad, como sensores básicos o sistemas simples de recolección de datos. Esto reduce el riesgo de fracaso y permite beneficios visibles en el corto plazo. Este principio

se relaciona con el modelo de difusión de innovaciones de Rogers (1962), que describe la adopción como un proceso en cinco etapas: conocimiento, persuasión, decisión, implementación y confirmación. En el contexto de las PYMEs colombianas, este enfoque destaca la importancia de ajustar la adopción tecnológica al entorno y a la disposición del actor organizacional. La Figura 3 muestra cómo factores como los canales de comunicación y las condiciones del sistema influyen en este proceso de decisión.

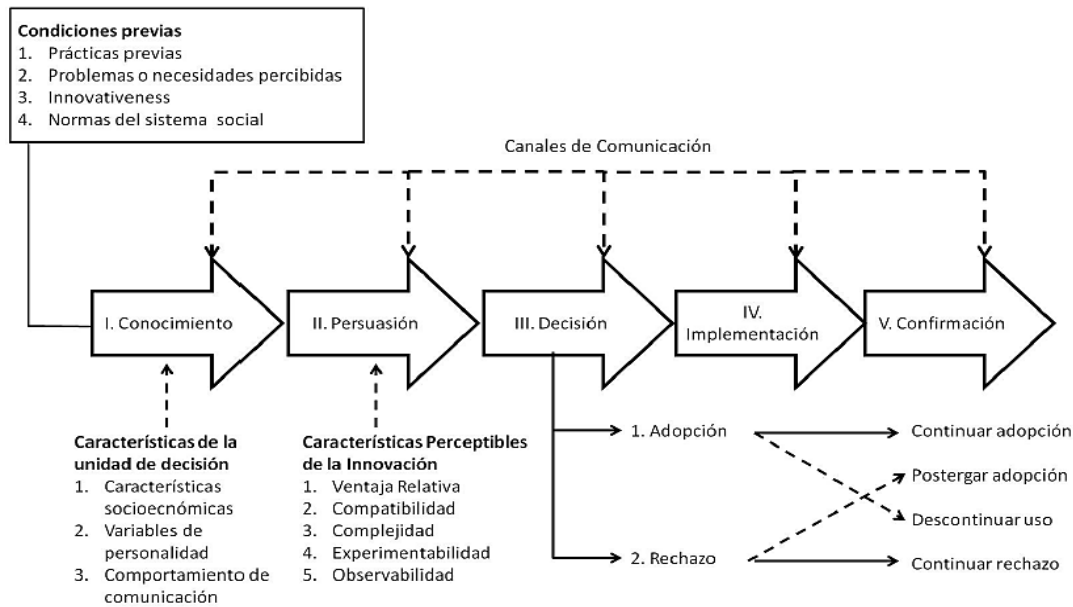


Figura 3. Proceso de decisión de innovaciones. (Rogers, 2003)

2. Cambio cultural como condición habilitante.

La innovación tecnológica requiere condiciones culturales que la respalden y sostengan en el tiempo. En organizaciones pequeñas y medianas, el liderazgo, la apertura al aprendizaje y la disposición al cambio son factores determinantes para el éxito de cualquier iniciativa de transformación.

Según Piderit (2000), la resistencia al cambio organizacional no debe entenderse de forma simplista como una actitud negativa, sino como un fenómeno multidimensional, que incluye componentes emocionales, cognitivos y conductuales. Por ejemplo, una persona puede estar

intelectualmente de acuerdo con una innovación, pero emocionalmente insegura frente a su implementación, generando contradicciones internas que afectan el comportamiento colectivo. Reconocer estas dimensiones permite diseñar estrategias más efectivas para gestionar el cambio, como la creación de liderazgos internos, programas de formación y espacios de diálogo.

Desde una perspectiva organizacional, el cambio cultural debe promoverse mediante el diagnóstico del tipo de cultura dominante (Cameron y Quinn, 2011), y la implementación de intervenciones graduales que alineen los valores del equipo con la visión tecnológica. Así, la transformación digital no se impone, sino que se construye desde la identidad organizacional.

3. Optimización operativa como base técnica.

Antes de adoptar tecnologías avanzadas, las PYMEs deben primero optimizar sus procesos actuales. Mejorar la operación permite identificar cuellos de botella, eliminar desperdicios y estandarizar tareas, lo que facilita una integración tecnológica más efectiva.

En este contexto, el enfoque Kaizen ofrece una estrategia accesible y eficiente, basada en mejoras continuas impulsadas por el equipo, sin necesidad de grandes inversiones. Como filosofía, Kaizen promueve acciones pequeñas y constantes orientadas al valor agregado, fomentando una cultura de aprendizaje y calidad (Imai, 2012).

Aplicar primero herramientas simples de mejora garantiza que la tecnología se incorpore sobre procesos ya estabilizados, reduciendo la complejidad y aumentando el retorno de inversión.

3.6 Diagnóstico de madurez digital en PYMEs

La implementación tecnológica debe estar precedida por un diagnóstico de madurez digital que permita identificar las capacidades actuales de Bordatodo en distintas dimensiones. Este enfoque permite adaptar la estrategia de adopción a las verdaderas condiciones internas y evitar soluciones prematuras o inadecuadas.

Kane et al. (2015) proponen un modelo de cuatro niveles de madurez digital, que permite clasificar a las organizaciones de acuerdo con su integración tecnológica, liderazgo y cultura digital, véase en la Tabla 2:

Nivel de madurez	Descripción
Principiante	Adopción limitada de tecnología, procesos aislados, sin visión digital clara.
En desarrollo	Iniciativas digitales puntuales, liderazgo emergente, bajo alineamiento cultural.
Competente	Integración moderada de tecnologías, cultura digital creciente, procesos conectados.
Avanzado	Transformación digital integrada, liderazgo activo, toma de decisiones basada en datos.

Tabla 2. Modelo de madurez digital adaptado de Kane et al. (2015)

Este marco permite no solo identificar el punto de partida de una PYME, sino también orientar el diseño de rutas de transformación que prioricen acciones según su nivel de preparación.

4. METODOLOGÍA

4.1 Enfoque y Diseño de Estudio.

La presente investigación adopta un enfoque mixto, combinando métodos cuantitativos y cualitativos, lo que permite una comprensión integral del fenómeno estudiado. Según Hernández Sampieri et al. (2022), el enfoque mixto resulta adecuado cuando se busca aprovechar la complementariedad entre datos numéricos y descripciones contextuales para resolver problemas aplicados en entornos reales.

El diseño metodológico es de tipo aplicado y exploratorio-descriptivo, ya que se orienta a ofrecer soluciones prácticas y contextualizadas en una organización específica, más que a la generación de teorías generales. La investigación se lleva a cabo en una empresa de bordados computarizados, con el fin de identificar oportunidades de mejora tecnológica, evaluar la viabilidad de implementación de herramientas de Industria 4.0 y proponer un modelo de adopción progresiva adaptado a sus capacidades reales.

4.2 Fases metodológicas

A continuación, se detallan las fases metodológicas del estudio. La Tabla 3 resume de manera clara y estructurada los objetivos específicos de cada fase, las técnicas e instrumentos que se utilizarán para su desarrollo, y los resultados esperados que se obtendrán al concluir cada una de estas etapas.

Fase	Objetivo principal	Técnicas	Instrumentos	Resultado esperado
Diagnóstico técnico-operativo	Identificar cuellos de botella y procesos crítico	Análisis de tiempos (MTM), mapeo de procesos	Hojas de trabajo MTM, cronómetro, diagramas de flujo	Línea base del desempeño productivo actual
Recolección de información	Obtener percepción gerencial sobre capacidades y barreras	Entrevistas semiestructuradas	Guion de entrevistas	Contexto organizacional e identificación de barreras estratégicas
Análisis de viabilidad	Evaluar tecnologías aplicables	Matriz de priorización tecnológica	Escala de madurez, ROI, facilidad de integración	Tecnologías 4.0 seleccionadas y jerarquizadas por viabilidad
Diseño de propuesta tecnológica	Estructurar modelo escalonado de adopción	Diseño de roadmap tecnológico	Documento de planificación con fases, KPIs, responsables	Propuesta detallada, modular y realista para la adopción progresiva de tecnologías
Evaluación del impacto	Estimar beneficios operativos esperados	Simulación de procesos, análisis comparativo de KPIs	KPIs antes y después, estimaciones de mejora en productividad y eficiencia	Evidencia proyectada del impacto positivo en la operación empresarial

Tabla 3. Etapas metodológicas. (Elaboración propia)

Como complemento, la Figura 4 presenta un diagrama de flujo que permite visualizar de forma clara y secuencial el recorrido metodológico seguido en esta investigación. Este recurso gráfico ayuda a comprender cómo se articulan las fases del estudio, desde el diagnóstico inicial hasta la formulación de la propuesta, resaltando la interacción entre técnicas cuantitativas y cualitativas.

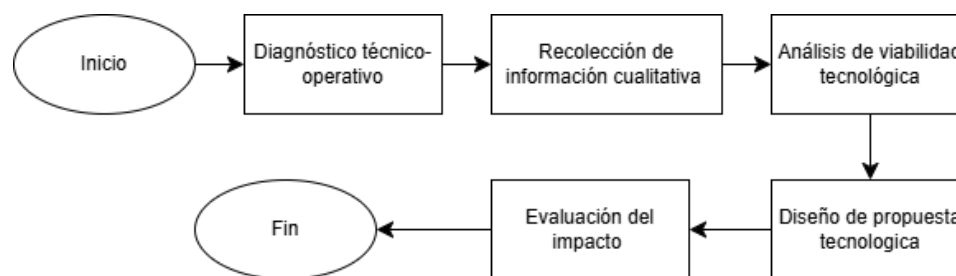


Figura 4. Diagrama metodológico. (Elaboración propia)

4.2.1 Triangulación metodológica

Para fortalecer la validez de los hallazgos obtenidos durante el estudio, se aplicó una estrategia de triangulación metodológica que permitió contrastar diferentes tipos de información provenientes de diversas fuentes, incrementando la fiabilidad de los resultados.

Esta triangulación se estructuró en tres dimensiones:

- Triangulación de datos cuantitativos y cualitativos: Se combinaron mediciones objetivas mediante el análisis MTM y los registros operativos digitalizados con información contextual obtenida a través de entrevistas informales con el personal y análisis documental interno.
- Triangulación de métodos: Se emplearon herramientas diversas, como cronometraje directo, matrices de Excel automatizadas, reportes semanales digitalizados, simulación de escenarios y escalas de priorización tecnológica, lo que permitió observar el fenómeno desde distintos enfoques técnicos y organizacionales.

- Triangulación de fuentes: Se incluyó la perspectiva de todos los actores de la empresa (operarios y dirección), contrastando sus experiencias con los datos generados por la medición operativa y los registros históricos.

Esta estrategia aportó mayor robustez a la validación de la propuesta, al garantizar que los resultados no dependieran exclusivamente de un único método o tipo de información. Así, la triangulación actuó como mecanismo central para aumentar la credibilidad del diseño del roadmap tecnológico y de las recomendaciones resultantes.

4.3 Población y Muestra.

La población objeto de estudio se circunscribe exclusivamente a la empresa de bordados computarizados donde se lleva a cabo la investigación. Esta organización cuenta con 6 colaboradores, entre operativos y administrativos, lo que permite un abordaje integral de todos los procesos internos desde una perspectiva aplicada.

El diseño muestral es intencional y por conveniencia, propio de investigaciones aplicadas con énfasis en el estudio profundo de un solo caso. Dado el tamaño de la empresa, se trabajará con la totalidad de su personal para asegurar una comprensión holística del entorno operativo, estratégico y cultural.

4.4 Criterios de inclusión.

- Ser parte activa del equipo de la empresa de bordados computarizados.
- Tener conocimiento o experiencia directa en los procesos operativos o administrativos.
- Disposición para participar en entrevistas, observaciones y sesiones de diagnóstico.

4.5 Criterios de exclusión.

- Personal externo que no intervenga directamente en los procesos de producción.
- Colaboradores que no puedan participar en todas las fases del estudio.
- Áreas no operativas cuya intervención no sea relevante para la adopción tecnológica.

4.6 Cronograma.

Como muestra la Tabla 4, las actividades se organizan por etapas para facilitar una transición ordenada hacia la transformación digital en Bordatodo.

Fase	Duración estimada	Actividades clave
Fase 1: Diagnóstico	Semana 1 - 2	Análisis MTM, observación directa, levantamiento de procesos
Fase 2: Recolección cualitativa	Semana 3	Análisis de información interna suministrada por gerencia
Fase 3: Análisis de viabilidad	Semana 4	Matriz de evaluación tecnológica, priorización de herramientas 4.0
Fase 4: Diseño de propuesta	Semana 5	Construcción del roadmap tecnológico, definición de KPIs
Fase 5: Evaluación del impacto	Semana 6	Simulación de escenarios y validación cuantitativa
Total duración	6 semanas	Proyecto de intervención y análisis aplicado en contexto real empresarial

Tabla 4. Cronograma de actividades. (Elaboración propia)

4.7 Validación de resultados

Aunque esta investigación se presenta como una propuesta, se incorporan mecanismos para garantizar la confiabilidad de los datos recolectados y la proyección realista de los resultados:

- Triangulación de fuentes: Se contrastarán los datos obtenidos a través del análisis MTM con las percepciones expresadas por la gerencia, lo que permitirá verificar la consistencia entre los hallazgos técnicos y los aspectos organizacionales.

- **Proyección basada en datos reales:** Se utilizarán reportes internos de producción correspondientes a una semana de trabajo, facilitados por la empresa Bordatodo, como insumo base para realizar simulaciones de desempeño. Estos datos permitirán estimar con mayor precisión indicadores proyectados de eficiencia, tasa de producción y ocupación.
- **Simulación con herramientas accesibles:** Dado que no existen indicadores formales actualmente en la empresa, se estructurarán matrices en Excel para establecer una línea base inicial y simular escenarios a partir de la propuesta.
- **Compromiso ético y transparencia:** Todos los participantes involucrados en la investigación serán informados sobre sus derechos y el uso de los datos. Se garantizará la confidencialidad de la información proporcionada y se fomentará una comunicación transparente con la empresa para asegurar la pertinencia de los indicadores propuestos.

4.8 Consideraciones éticas

Esta investigación cumple con principios éticos fundamentales, incluyendo:

- **Consentimiento informado no formal:** Aunque no se realizarán entrevistas estructuradas, se informará previamente a los participantes sobre su rol en el estudio y el uso de los datos.
- **Confidencialidad de los datos:** Toda la información será usada exclusivamente con fines académicos, resguardando datos técnicos y personales bajo medidas de seguridad digital.

- Protección de la identidad organizacional: Se evitarán referencias explícitas que permitan identificar directamente a personas o procesos.
- Comunicación responsable con la empresa: Se mantendrá una relación ética y de confianza basada en transparencia, respeto y colaboración.

4.9 Limitaciones del estudio

- Estudio de caso único: Los hallazgos no pueden generalizarse directamente a otras empresas, aunque pueden servir como referencia para PYMEs con características similares.
- Ausencia de sistemas de información: La empresa no cuenta con plataformas digitales para registrar procesos productivos, lo que limita la disponibilidad de datos históricos.
- Nivel de digitalización incipiente: Según el modelo de madurez digital de Kane (2015), la empresa se encuentra en una fase inicial, con bajo uso de tecnologías digitales, mínima automatización y escasa infraestructura para análisis de datos.
- Cambio en el enfoque cualitativo: Por solicitud de la empresa, se eliminó la aplicación de entrevistas formales. En su lugar, se empleará el análisis de documentación interna y la comunicación directa con la gerencia como fuente de comprensión contextual.

5. RESULTADOS

5.1 Introducción al diagnóstico.

Para formular una estrategia de transformación digital alineada con las necesidades reales de la empresa Bordatodo, es esencial comprender en detalle el estado actual de sus procesos productivos. Esta comprensión permite identificar con precisión limitaciones operativas, desperdicios, tiempos muertos y cuellos de botella que afectan directamente la eficiencia y la productividad en su línea de bordado computarizado.

Como punto de partida para este diagnóstico, se establece una línea base del proceso actual. Esta línea base servirá como referencia para evaluar posteriormente el impacto de las tecnologías propuestas. Para ello, se emplean dos herramientas complementarias: el mapeo del proceso a nivel macro y el análisis de tiempos y movimientos en la etapa productiva, donde se concentran operaciones manuales repetitivas con alto impacto en el desempeño general.

Como se muestra en la Figura 5, el proceso productivo de Bordatodo inicia con la recepción de la orden de producción y continúa a través de una serie de etapas clave hasta la entrega final al cliente.

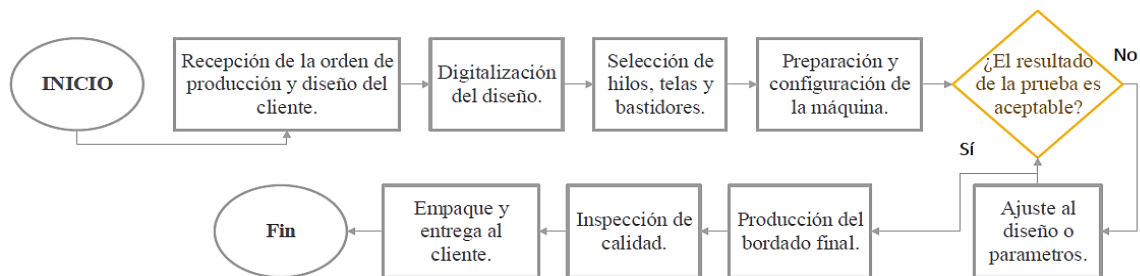


Figura 5. Diagrama general del proceso de producción en Bordatodo. (Elaboración propia)

5.1.1 Mapeo de procesos.

El proceso de producción de la empresa estudiada se divide en ocho etapas principales, organizadas en secuencia lógica desde la recepción del pedido hasta la entrega final del producto. Estas etapas son:

- 1.** Empalme con el operador anterior: Comunicación del turno anterior para continuidad del trabajo.
- 2.** Grabación del diseño en máquina: Carga del diseño digitalizado si la máquina lo requiere.
- 3.** Preparación de bastidor y materiales (entamborar): Alineación y fijación de la tela sobre el bastidor.
- 4.** Ejecución del bordado: Operación automática de la máquina bordadora.
- 5.** Preparación para el cambio: Preparación anticipada del siguiente bastidor durante la ejecución actual.
- 6.** Recogida y alimentación de la máquina: Retiro de la prenda bordada y alimentación de una nueva.
- 7.** Pulido de prendas: Eliminación de hilos residuales y acabado fino.
- 8.** Control de calidad y embalaje: Revisión de defectos, conteo y preparación para entrega.

Estas operaciones fueron documentadas mediante observación directa y entrevistas con el personal operativo, generando un mapa funcional que identifica claramente responsables, secuencia, insumos requeridos y tiempos estimados para cada actividad como se logra apreciar en la Figura 6.

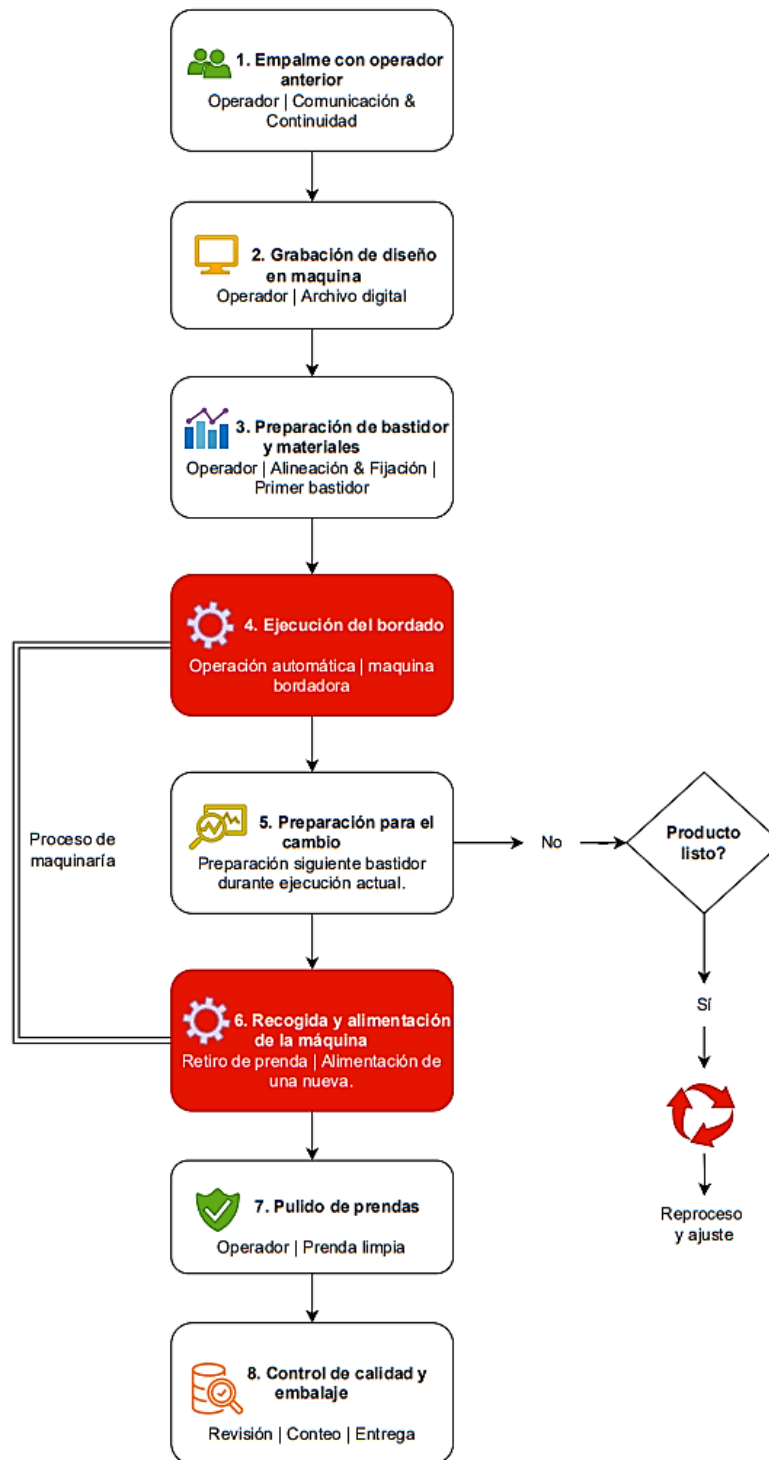


Figura 6. Diagrama detallado de la etapa productiva. (Elaboración propia)

5.1.2 Análisis de tiempos (MTM)

En el análisis preliminar para la aplicación del método MTM en las operaciones manuales de Bordatodo, se identificó que muchas de estas actividades se ejecutan de manera simultánea al funcionamiento de la máquina. Por tanto, no serán evaluadas individualmente mediante MTM, sino que su aporte se considerará dentro del cálculo correspondiente al tiempo de actividad de la máquina. Este indicador se determinará con base en el tiempo efectivo de producción por turno, tomando en cuenta el número de puntadas realizadas, la velocidad de operación en RPM y la cantidad de ciclos completados en la máquina de ocho cabezotes objeto del estudio. Así, el análisis MTM se aplicará exclusivamente a aquellas operaciones manuales que representen tiempo adicional al ciclo de la máquina, como la grabación del diseño en la pantalla, la alimentación y la recolección del material. Para ello, el levantamiento de datos se realizará mediante observación directa con cronómetro, apoyado en hojas estandarizadas de discriminación de tiempos MTM ya disponibles, específicamente las correspondientes a la Tabla 5, que permitirán registrar y codificar cada micromovimiento y calcular con mayor precisión el tiempo productivo de cada turno, facilitando el desarrollo de indicadores clave de desempeño del proceso.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO				
PRODUCTO: CAMISA	OPERACIÓN:		SIGUE A:	
MAQUINA:	VIENE DE:			
FECHA:	ACCESORIOS A			
ACTUAL/PROPUESTO:	UTILIZAR:			
DESCRIPCION DE ELEMENTOS				
	LEFT	TMU	RIGHT	

Tabla 5. Hojas para medición de micromovimientos. (Elaboración propia)

5.1.3 Alimentación y recolección de producción.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO				
PRODUCTO:	<u>Camisa</u>	OPERACIÓN:	<u>Alimentación y recolección</u>	
MAQUINA:	<u>Barudan</u>	VIENE DE:	<u>-</u>	SIGUE A:
FECHA:	<u>22/05/25</u>	ACCESORIOS:	<u>-</u>	Ejecución de bordado
ACTUAL/PROPUESTO	<u>Actual</u>			
DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS				
	LEFT	TMU	RIGHT	
	EF	7,3	EF	Enfocar tambor en maquina
		13,0	R50A	Alcanzar tambor
		2,0	G1A	Coger tambor
		22,9	D3E	Desmontar tambor
		13,3	M30B	Mover tambor hacia base de maquina
		9,1	P1SSE	Posicionar tambor
		2,0	RL1	Soltar tambor
Enfocar tambor en maquina	EF	7,3	EF	
Alcanzar tambor	mR20d	8,5		
Coger tambor	G1A	2,0		
Mover tambor hacia maquina	M20B	13,3		
		6,4	mR10D	Alcanzar tambor
		2,0	G1A	Coger tambor
Mover tambor	mM1C	7,3	mM16C	Mover tambor
Posicionar tambor en maquina	P3NSE	47,8	P3NSE	Posicionar tambor en maquina
Sostener		10,6	APA	Introducir tambor en maquina (Aplicar presión)
Introducir tambor en maquina (Aplicar presión)	APA	10,6	RL1	Soltar tambor
Soltar tambor	RL1	2,0		
	EF	7,3	EF	Enfocar botón de arranque
		9,5	R30A	Alcanzar botón
		10,6	APA	Arrancar maquina
POR CABEZOTE			214,8	TOTAL TMU (FIJO) x Cabezote
			0,129	TOTAL MINUTOS (FIJOS)
			0,143	TOTAL MINUTOS (11% DE PF)

Tabla 6. Estudio MTM #1. (Elaboración propia)

5.1.4 Grabación del diseño en máquina y punto central.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO				
PRODUCTO:	Camisa	OPERACIÓN:	Grabar diseño en maquina	
MAQUINA:	Barudan	VIENE DE:	-	SIGUE A: Ejecución de bordado
FECHA:	22/05/202	ACCESORIOS:	Guía de diseño	
ACTUAL/PROPUESTO: Actual				
DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS				
	LEFT	TMU	RIGHT	
	EF	7,3	EF	Enfocar pantalla
		27,7	R80D	Alcanzar centro del control
	EF	7,3	EF	Enfocar símbolo de cargar USB
		10,6	APA	Oprimir boton USB
	EF	7,3	EF	Enfocar origen (comando de selección)
		6,5	R6D	Alcanzar origen
		106,0	APA	Oprimir boton x10
		444,0	MAN	16 segundos de espera
	EF	7,3	EF	Enfocar dedo de selección
		7,5	R8D	Alcanzar dedo de selección
		21,2	APA	Oprimir boton x2
	EF	7,3	EF	Enfocar barco (indicador de color)
		2,0	R2D	Alcanzar indicador de color
		10,6	APA	Oprimir boton (indicador de color)
	EF	7,3	EF	Enfocar B (comandos superiores)
		5,1	R4D	Alcanzar B
		159,0	APA	Oprimir B (selección de agujas) x15
	EF	7,3	EF	Enfocar D (siguiente)
		6,5	R6D	Alcanzar D
		10,6	APA	Oprimir D (para selección del próximo color)
	EF	7,3	EF	Enfocar B (comandos superiores)
		6,5	R6D	Alcanzar B
		159	APA	Oprimir B (selección de agujas a utilizar) x15
	EF	7,3	EF	Enfocar D (siguiente)
		6,5	R6D	Alcanzar D
		10,6	APA	Oprimir D (guardar parámetros)
	EF	7,3	EF	Enfocar dedo de selección
		5,1	R4D	Alcanzar dedo de selección
		10,6	APA	Oprimir boton (marcación de punto)

	EF	7,3	EF	Enfocar A
		2,0	R2D	Alcanzar B
		10,6	APA	Oprimir A(marcar punto céntrico)
		2	RL1	Soltar
Dar un paso hacia la izquierda	SS50C1	21,0	SS50C1	Dar un paso hacia la izquierda
Alcanzar aguja (principal)	R80D	27,7		
Ejercer presión (bajar aguja)	APB	16,2		
	EF	7,3	EF	Enfocar origen (comando de selección)
		27,7	R80D	Alcanzar origen (comando de selección)
		212,0	APA	Oprimir botón (comando de selección) x 20
		30,3	R90D	Alcanzar arranque de maquina
		2,0	G1A	Coger barra arranque
		10,6	APA	Arrancar maquina
			1465	TOTAL TMU (FIJO)
			0,88	TOTAL MINUTOS
			0,98	TOTAL MINUTOS (11% de PF)

Tabla 7. Estudio MTM #2. (Elaboración propia)

5.1.5 Cambio de carretes.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO				
PRODUCTO:	Camisa	OPERACIÓN:	Cambiar carretel	
MAQUINA:	Barudan	VIENE DE:	-	SIGUE A: Ejecución de bordado
FECHA:	23/05/2020	ACCESORIOS:	-	
ACTUAL/PROPUESTO : Actual				
DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS				
	LEFT	TMU	RIGHT	
	EF	7,3	EF	Enfocar carretel
		52,2	W3M	Caminar hacia carretel
		19,6	R50D	Alcanzar carretel
		2,0	G1A	Coger carretel
		52,2	W3M	Caminar hacia maquina
Alcanzar capsula de bobina	R80D	27,7		
Coger soporte	G1A	2,0		
Desmontar soporte	D1E	4,0		
Alcanzar bobina	R4D	5,1		
Coger bobina	G1A	2,0		

Desmontar bobina	D1D	5,7		
Mover hacia mano derecha	M50 B	18,0		
		18,4	R50B	Alcanzar bobina
		29,0	APB+	Coger, desmontar, alcanzar y meter carretel
		5,4	mM10 C	Enhebrar carretel
		25,2	M80B	Mover hacia maquina
		53,4	P3NS3	Posicionar
		10,6	APA	Insertar en maquina
		2	SL1	Soltar
		22,3	APB	Alcanzar, coger, montar y soltar soporte
		27,7	R80D	Alcanzar boton de arranque
		10,6	APA	Arrancar maquina
POR CARRETEL			402,4	TOTAL TMU (FIJO)
			0,24	TOTAL MINUTOS
			0,27	TOTAL MINUTOS (11% DE PF)

Tabla 8. Estudio MTM #3. (Elaboración propia)

5.1.6 Validación de tiempos estándar MTM

Para asegurar la confiabilidad de los tiempos estándar definidos mediante el método MTM, se llevó a cabo una validación directa en planta mediante cronometraje, evaluando su correspondencia con el comportamiento real de las operaciones manuales más relevantes del proceso de bordado. Esta verificación se centró en tres tareas principales: alimentación y recolección de producción, grabación del diseño en máquina y cambio de carretes, además de la actividad de empalme con el operador del turno anterior, que incorpora tiempos de comunicación y coordinación.

Las mediciones se realizaron con un total de cuatro observaciones por operación, y se tomaron como referencia los promedios de cronometraje obtenidos en condiciones reales de trabajo. Los resultados se muestran en la Tabla 9:

Operación Manual	Tiempo Cronometrado Promedio (min)	Tiempo Estándar MTM (min)	Diferencia Absoluta (min)	Variación (%)
Alimentación y recolección	1,16	1,14	0,02	+1,75 %
Cambio de carretel	0,29	0,27	0,02	+7,41 %
Grabación del diseño en máquina	1,50	0,98	0,52	+53,06 %
Empalme con operador anterior (*)	12,46	8,62	3,84	+44,54 %

Tabla 9. Tiempos cronometrados vs MTM. (Elaboración propia)

(*) El tiempo estándar del empalme se obtuvo como suma de las tareas base estandarizadas y el tiempo cronometrado para la transferencia de información.

Estas diferencias permiten identificar qué tan representativos son los estándares definidos en la fase de análisis. En tareas mecánicas y repetitivas, como alimentación de máquina y cambio de carretel, los tiempos MTM mostraron una alta concordancia con el comportamiento real. No obstante, en actividades sujetas a variabilidad operativa, como la grabación del diseño y el empalme de turno, se identificaron desviaciones más significativas, atribuibles a factores como carga de archivos, disponibilidad de insumos o nivel de comunicación entre operarios.

Se trabajó con un operador principal y dos auxiliares, y las observaciones fueron promediadas para obtener representatividad del proceso en condiciones normales.

- **Conclusión técnica de la validación:**

El diagnóstico técnico permitió establecer que los tiempos estándar MTM son confiables para representar las operaciones repetitivas bajo condiciones controladas. Sin embargo, el sistema

presenta variabilidad estructural en operaciones de alta dependencia organizacional, que exige medidas de estandarización complementarias y herramientas tecnológicas de apoyo para asegurar la alineación entre el tiempo real y el tiempo objetivo.

Este ejercicio de validación refuerza la necesidad de implementar instrumentos digitales de recolección de datos y monitoreo, como los ya propuestos en fases posteriores del roadmap, con el fin de mejorar la trazabilidad, facilitar la retroalimentación operativa y fortalecer la toma de decisiones basada en datos observables y repetibles.

5.2 Indicadores de desempeño.

Con las tablas MTM y el análisis de las operaciones manuales ya realizados, el siguiente paso fue establecer líneas base para los indicadores clave de desempeño (KPIs) que permitan medir con precisión la productividad operativa de Bordatodo. Para ello, se seleccionaron KPIs relevantes, tales como tiempos de ciclo, eficiencia operativa y tasa de producción.

- **Tiempos de ciclo:** Se analizaron las operaciones manuales críticas que impactan el ciclo total del proceso, como el empalme con el operador anterior, la grabación del diseño, la recolección y alimentación de la máquina, y el cambio del carretel. La Tabla 10 muestra los tiempos estándar y observados para cada actividad, evidenciando pequeñas diferencias que reflejan oportunidades de mejora en la reducción de demoras y optimización del flujo.

Operación Manual	Tiempo Estándar	Tiempo Observado	Diferencia	Comentarios
Empalme con operador anterior	4,26	7,51	3,25	Demora por falta de prealistado
Grabación del diseño	0,98	1,5	0,52	Retrasos por carga de archivos
Recolección y alimentación	1,14	1,16	0,02	Buena ejecución
Cambio del carretel	0,27	0,29	0,03	Buena ejecución

Tabla 10. KPI #1. (Elaboración propia)

- **Eficiencia operativa:** Se evaluó la eficiencia de dos días de muestra, estos corresponden al doce y trece de mayo del presente año, calculando la relación entre el tiempo productivo efectivo y el tiempo total disponible. Como se observa en la Tabla 11, los porcentajes de eficiencia alcanzados son del 65% y 90%, respectivamente, indicando que aún existen márgenes para mejorar la utilización del tiempo y reducir pérdidas operativas.

Turno	Tiempo Total Disponible (min)	Tiempo Productivo Efectivo (min)	Eficiencia (%) = (Productivo / Disponible)*100
12-mayo	323	500	65%
13-mayo	450	500	90%

Tabla 11. KPI #2. (Elaboración propia)

- **Tasa de producción:** Para ilustrar la capacidad productiva, se presenta la tasa de producción correspondiente al doce y trece de mayo respectivamente. Como se muestra en la Tabla 12, la producción varía entre un día y otro, esto debido a los estilos y los cambios de bordado entre un día y otro.

Día	Unidades Producidas	Horas Trabajadas	Tasa de Producción (unidades/hora)
12-mayo	288	9	32
13-mayo	469	9	52

Tabla 12. KPI #3. (Elaboración propia)

El establecimiento de estas líneas base representa un avance fundamental para cuantificar el impacto de las actividades manuales en la productividad total y para orientar futuras acciones de mejora continua. Con estos indicadores claros, Bordatodo podrá monitorear su desempeño operativo con mayor precisión y tomar decisiones estratégicas fundamentadas en datos concretos.

5.2.1 Análisis de variabilidad y tendencias operativas

Para complementar el análisis cuantitativo de los KPIs establecidos, se evaluó la variabilidad operativa durante una semana de producción en Bordatodo, considerando indicadores como eficiencia operativa, unidades producidas y número de cambios de diseño por día.

Este análisis permitió identificar que el desempeño de la planta no es homogéneo, y que existe una relación entre la frecuencia de cambios de estilo y la eficiencia alcanzada. Por ejemplo, el día martes, con solo 4 cambios, se logró una eficiencia del 90%, mientras que el viernes, con 8 cambios, la eficiencia cayó al 46%. Esta tendencia sugiere que los cambios frecuentes requieren mayor intervención manual y ajustes, lo que genera interrupciones y tiempos improductivos.

La siguiente Tabla 13 resume los principales indicadores diarios evaluados:

Día	Unidades Producidas	Cambios de Diseño	Minutos Disponibles	Minutos Producidos	Eficiencia (%)
Lunes	288	11	500	323	65
Martes	469	4	500	450	90
Miércoles	176	1	500	324	65
Jueves	448	6	500	329	66
Viernes	192	8	500	229	46
Sábado	151	5	350	157	49

Tabla 13. Datos del sistema de producción. (Elaboración propia)

1. Análisis estadístico de la eficiencia operativa

Para evaluar la estabilidad y confiabilidad del sistema productivo de Bordatodo, se analizaron los datos de eficiencia operativa registrados durante una semana laboral. Este análisis incluyó el cálculo del promedio, la desviación estándar y la aplicación de una prueba de normalidad, con el fin de caracterizar la variabilidad del desempeño e identificar si los datos cumplen con los supuestos estadísticos requeridos para proyecciones posteriores. Los valores de eficiencia diaria se resumen en la Tabla 13.

- Eficiencia promedio semanal: 63.5%
- Desviación estándar: 15.6 puntos porcentuales

La desviación estándar obtenida indica una alta dispersión de los datos respecto al promedio, lo que evidencia una marcada inestabilidad operativa. En términos prácticos, esta variabilidad representa un riesgo para la planificación y control de recursos, ya que dificulta la predicción del comportamiento productivo bajo condiciones normales.

Adicionalmente, para determinar si los datos de eficiencia siguen una distribución normal, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, recomendada para muestras pequeñas. Este análisis

estadístico permite validar si los datos pueden ser utilizados en métodos proyectivos que asumen normalidad.

- Estadístico W: 0.8891
- Valor p: 0.3135

Dado que el valor p es mayor a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula de normalidad. Por lo tanto, se concluye que los datos siguen una distribución normal, lo que respalda su utilización como base para simulaciones operativas y proyecciones económicas a mediano plazo.

Esta validación fortalece la rigurosidad del análisis cuantitativo del proyecto y proporciona una base estadísticamente sólida para las decisiones proyectadas en el modelo de adopción tecnológica.

2. Tendencias clave identificadas

A partir del análisis de la semana productiva, se identificaron las siguientes tendencias:

- 2.1** La eficiencia más alta (90%) se alcanzó el martes, día en que se realizaron solo 4 cambios de diseño. Esto sugiere que una menor carga de tareas manuales favorece un mayor tiempo efectivo de operación de las máquinas.
- 2.2** El día miércoles presentó solo 1 cambio, pero su eficiencia fue similar a la del lunes (65%). Esto indica que, aunque reducir los cambios es favorable, también influyen factores como la efectividad del operador, la complejidad del diseño o posibles interrupciones no documentadas.

2.3 Los viernes y sábados reflejan la menor eficiencia (46% y 49%), lo cual coincide con días de mayor rotación de estilos y menor disponibilidad horaria (en el caso del sábado).

Esto evidencia una sobrecarga operativa y menor control sobre la jornada.

2.4 No existe una correlación directa entre unidades producidas y eficiencia, ya que esta última depende del número de puntadas de cada diseño, no del volumen de piezas.

Estas tendencias refuerzan la importancia de implementar mecanismos de trazabilidad digital, estandarización de procesos y monitoreo en tiempo real, lo que permitirá reducir la variabilidad, mejorar la previsibilidad operativa y facilitar decisiones basadas en datos confiables.

5.2.2 Comparación con benchmark del sector

En el marco del diagnóstico, se identificó como caso referencial a la empresa Supertex, reconocida por su integración progresiva de tecnologías para el monitoreo y trazabilidad de la eficiencia operativa. Aunque se trata de una empresa de gran escala con más de 1.000 colaboradores, su modelo de transformación digital sirve como referente estratégico para definir la dirección del cambio en empresas más pequeñas como Bordatodo.

- **Tecnologías implementadas:**

Supertex implementa un sistema de captura de datos mediante códigos QR adheridos a un cuaderno físico por cada máquina. Al finalizar la jornada laboral, estos códigos son leídos en el área de SUMA, utilizando un software especializado. Este proceso da lugar a la generación de un archivo que un colaborador descarga y carga en un Excel personalizado, el cual incluye

macros programadas para producir reportes detallados de eficiencia y trazabilidad por turno y por máquina.

Este proceso, aunque automatizado en sus etapas críticas, mantiene una intervención manual en el flujo de trabajo, lo cual evidencia que incluso en empresas grandes, la transformación digital es escalonada y adaptativa, con elementos de semiautomatización en ciertos puntos del sistema.

- **Nivel de madurez tecnológica:**

Aunque no se tiene una línea temporal exacta de la implementación, se sabe que el modelo actual ha sido desarrollado a través de múltiples etapas, a lo largo de los últimos años. Esto demuestra que no se requiere una digitalización completa desde el inicio, sino que se puede evolucionar mediante fases controladas, iniciando por la recolección estructurada de datos y el análisis semiautomático.

- **Relevancia para Bordatodo:**

A pesar de la diferencia de escala, la lógica del sistema implementado por Supertex refleja directamente el camino que se está comenzando a trazar en Bordatodo. El uso inicial de formatos físicos con codificación, seguido por su lectura e integración en un software para generar reportes automatizados, se alinea con los objetivos definidos en el roadmap tecnológico planteado para Bordatodo.

Esto confirma que el enfoque de transformación propuesto no solo es viable, sino que está alineado con las mejores prácticas del sector, adaptadas a los recursos disponibles. El caso de Supertex valida también que incluso grandes empresas mantienen procesos manuales

estructurados en etapas tempranas de su digitalización, como los que ahora se pretenden implementar en la organización evaluada.

- **Conclusión del benchmark:**

El caso Supertex demuestra que una mejora de hasta el 10 % en eficiencia puede lograrse mediante un proceso de transformación digital gradual. Bordatodo, al encontrarse en una etapa inicial, puede considerar esta experiencia como un modelo aspiracional realista, entendiendo que la clave del éxito está en establecer procesos medibles, trazables y estructurados desde etapas tempranas, lo que permite escalar progresivamente hacia sistemas más sofisticados con el tiempo.

5.2.3 Interpretación profunda de los resultados

El análisis integral de la eficiencia productiva en Bordatodo revela diversos factores que influyen directamente en el rendimiento operacional, tanto desde el punto de vista técnico como económico. A continuación, se interpretan los resultados obtenidos en los apartados anteriores considerando el contexto real de las operaciones:

5.2.3.1 Influencia del tipo de diseño en la eficiencia

La variabilidad en la eficiencia diaria no responde directamente al número de unidades producidas, sino a la complejidad del diseño bordado. Diseños con mayor número de puntadas y colores permiten una mayor operación simultánea con la máquina y más tiempo efectivo de producción, elevando así la eficiencia percibida incluso en jornadas con menor cantidad de unidades.

5.2.3.2 Dinámica operativa y distribución del trabajo

Durante la semana evaluada, solo se contó con un operador principal en jornada completa y auxiliares rotativos en turnos mañana y tarde. Esta estructura pudo afectar la fluidez de algunas tareas técnicas como el entamborado o la correcta configuración de diseños en máquina, especialmente en los días de menor eficiencia.

5.2.3.3 Frecuencia y manejo de cambios

Los cambios de diseño se realizaron todos los días, aunque en distinta frecuencia. Estas operaciones, si bien necesarias, representan tiempos improductivos indirectos, especialmente si no están bien sincronizadas con la operación de la máquina. Aunque el tiempo promedio por cambio es bajo (validado mediante estudio MTM), su impacto acumulado puede ser significativo.

5.2.3.4 Limitaciones en la gestión del tiempo improductivo

No se cuenta con un sistema formal de registro del tiempo improductivo, lo que dificulta identificar con precisión los factores que limitan la eficiencia. Esta carencia representa una barrera crítica para el análisis de pérdidas y la mejora continua, por lo que se recomienda implementar un formato digital que permita su trazabilidad.

5.2.3.5 Rentabilidad por hora trabajada

Además de la eficiencia técnica, la rentabilidad diaria debe analizarse en función de los ingresos generados por puntadas bordadas. Teniendo en cuenta que por cada puntada se cobra

\$0,25 COP y que la meta interna establecida por la gerencia es de \$50.000 COP por hora trabajada, se construyó la siguiente tabla comparativa:

Día	Puntadas totales	Ingreso generado (COP)	Tiempo trabajado (horas)	Meta esperada (COP)	Diferencia (COP)	¿Meta alcanzada?
Lunes	1.668.300	\$417.075	8,33	\$416.500	+\$575	✓
Martes	2.560.000	\$640.000	8,33	\$416.500	+\$223.500	✓
Miércoles	1.936.000	\$484.000	8,33	\$416.500	+\$67.500	✓
Jueves	1.784.400	\$446.100	8,33	\$416.500	+\$29.600	✓
Viernes	1.017.800	\$254.450	8,33	\$416.500	-\$162.050	✗
Sábado	830.100	\$207.525	5,83	\$291.500	-\$83.975	✗

Tabla 14. Rentabilidad diaria vs Esperada. (Elaboración propia)

Cálculos:

- Ingreso generado = Puntadas $\times$ \$0,25
- Meta esperada = Horas trabajadas $\times$ \$50.000 COP

Análisis:

- **Superávit económico:** De lunes a jueves se superó la meta económica, lo cual evidencia que, pese a las variaciones en eficiencia técnica, el volumen de puntadas es el principal determinante del ingreso.
- **Déficit económico:** Viernes y sábado no alcanzaron la meta. Esto se asocia a menor número de unidades, menor complejidad de diseño (menos puntadas) y menor eficiencia técnica.

- Relevancia del diseño en la rentabilidad: Un diseño con más de 7.000 puntadas genera más ingreso por unidad, y al requerir más tiempo de máquina, permite una mayor optimización del tiempo de operación incluso si las unidades son pocas.
- Importancia del enfoque mixto: La empresa debe planificar no solo por unidades, sino también por puntadas, complejidad y carga horaria. Este enfoque híbrido permite proyectar con mayor precisión la rentabilidad por jornada.

La implementación de métricas híbridas (por unidad, por puntada y por hora) fortalecerá la capacidad de Bordatodo para proyectar metas realistas y maximizar la eficiencia económica por jornada.

5.3 Evaluación de la factibilidad técnica y económica de adopción tecnológica.

5.3.1 Identificación de necesidades tecnológicas.

El análisis de los procesos productivos realizado en capítulos anteriores reveló una serie de limitaciones que afectan directamente la eficiencia operativa de la empresa Borda todo. Entre los principales hallazgos destacan:

- Falta de estandarización en los procesos de empalme entre turnos, generando tiempos improductivos por comunicación ineficiente.
- Ausencia de un sistema de registro automatizado, lo cual dificulta el acceso a información en tiempo real y limita la trazabilidad de la producción.
- Dependencia de operaciones manuales en etapas clave del proceso que, si bien están estructuradas, carecen de monitoreo automatizado para evaluar su impacto sobre el desempeño global.

- Inexistencia de indicadores clave de desempeño (KPIs) generados automáticamente, lo que impide una evaluación continua y objetiva del sistema productivo.

Estas observaciones hacen evidente la necesidad de incorporar herramientas tecnológicas que permitan mejorar la trazabilidad, estandarizar la recolección de datos, automatizar ciertos procesos y facilitar el análisis del desempeño operativo. A continuación, se presenta en la Tabla 14 la relación de necesidades detectadas con posibles tecnologías asociadas a la Industria 4.0.

Problema detectado	Necesidad tecnológica	Tecnología 4.0 aplicable
Registro manual de producción	Trazabilidad y monitoreo	Registro digital en Excel
Falta de monitoreo en eficiencia	Visualización de desempeño	Matrices automatizadas en Excel
Operaciones repetitivas no monitoreadas	Seguimiento y estandarización	Aplicación de MTM y captura de datos
Comunicación ineficiente entre turnos	Estandarización del empalme	Formatos digitales compartidos
Limitada trazabilidad de productos	Identificación por producto	Codificación QR

Tabla 14. Necesidades tecnológicas. (Elaboración propia)

5.3.2 Evaluación de opciones tecnológicas.

En este apartado se evaluaron opciones tecnológicas de bajo costo y rápida implementación, priorizando soluciones compatibles con el contexto económico y operativo de Bordatodo. Se optó por el uso de herramientas de hojas de cálculo en Excel, integradas con los datos obtenidos del análisis MTM y los tiempos proporcionados por la máquina bordadora, como una estrategia de transición hacia soluciones más complejas a mediano plazo.

El uso de Excel permitirá crear matrices personalizadas para el registro digital de la producción, cálculo automático de indicadores de desempeño (KPIs) y análisis de eficiencia en tiempo real. Esta solución ofrece múltiples ventajas:

- **Económica y accesible:** No requiere inversiones significativas ni formación técnica avanzada.
- **Flexible y adaptable:** Permite incorporar diferentes fuentes de datos, como los tiempos de máquina (tiempos de ejecución) y los tiempos MTM para operaciones manuales.
- **Transparente y didáctica:** Facilita la interpretación por parte de operarios y supervisores, fomentando una cultura de mejora continua.

Además, se propone el uso de códigos QR como alternativa inicial a tecnologías como RFID. Estos códigos pueden ser impresos e incorporados fácilmente en las órdenes de producción para mejorar la trazabilidad interna, sin necesidad de infraestructura costosa como se puede observar en la Tabla 15.

Tecnología Propuesta	Aplicación en Bordatodo	Requerimientos Técnicos	Facilidad de Integración	Impacto Esperado	Nivel de Prioridad
Excel + Matrices KPI	Registro digital, monitoreo de eficiencia	PC, formación básica en Excel	Alta	Alto	Alta
Aplicación MTM integrada	Análisis de tareas manuales	Datos de observación directa	Alta	Medio-alto	Alta
Códigos QR	Identificación y trazabilidad de productos	Impresora, escáner de cámara	Alta	Medio	Media

Tabla 15. Tecnologías propuestas. (Elaboración propia)

5.3.3 Análisis económico simplificado.

En la Tabla 16 se presenta un análisis económico preliminar de las tecnologías priorizadas, considerando tanto el costo de implementación como los beneficios potenciales asociados a la mejora del desempeño productivo. Se enfoca en soluciones de bajo costo, alta aplicabilidad y retorno tangible a corto plazo.

Tecnología	Costo Inicial Aproximado (USD)	Mantenimiento Anual (USD)	Beneficios Esperados	ROI Estimado
Registro digital en Excel	0 – 100 (software ya disponible)	0	Mejora en la trazabilidad, reducción de errores, visualización de KPIs	Alto
Matriz con tiempos MTM	0 – 50 (implementación propia)	0	Medición precisa del trabajo manual y mejora continua	Alto
Códigos QR	100 – 200 (impresora + etiquetas)	50	Mejora en la trazabilidad y control de procesos	Medio

Tabla 16. Retorno de inversión. (Elaboración propia)

Estas herramientas permiten generar impacto inmediato sin comprometer el presupuesto de la empresa, facilitando así una transición gradual y sostenible hacia la adopción de tecnologías 4.0.

5.3.3.1 Proyecciones económicas a mediano plazo

Para evaluar el impacto financiero de la propuesta tecnológica, se realizaron proyecciones a tres años, considerando una reducción gradual y conservadora en los errores de producción y una mejora paulatina en la eficiencia operativa.

En el primer año, se estima una reducción del 25% en los errores, generando un ahorro cercano a COP \$3.6 millones, y un ahorro mensual constante de COP \$250.000 en materiales

para reportes manuales. Además, se proyecta un aumento en la eficiencia operativa del 5%, lo que representa un beneficio adicional anual aproximado de COP \$5.7 millones. Esto da un ahorro total de aproximadamente COP \$12.3 millones, superando la inversión inicial de COP \$3.7 millones y resultando en un ROI positivo de cerca de COP \$8.6 millones.

Para el segundo año, la reducción de errores se incrementa a un 35%, aumentando el ahorro a más de COP \$5 millones, y la eficiencia operativa mejora un 7%, sumando beneficios totales de alrededor de COP \$15.2 millones. La inversión anual requerida disminuye a COP \$1.1 millones, incrementando el retorno neto acumulado.

En el tercer año, se proyecta una reducción de errores del 45% y una eficiencia del 10%, alcanzando ahorros cercanos a COP \$21 millones, con una inversión establecida similar al año anterior. Esto resulta en un retorno neto acumulado de aproximadamente COP \$42.5 millones.

Estas cifras reflejan que la inversión inicial y los costos recurrentes son ampliamente compensados por los beneficios económicos derivados de la reducción de errores y la optimización operativa, demostrando la viabilidad y sostenibilidad de la propuesta tecnológica, véase en la Tabla 17 y el ROI estimado en la Tabla 18.

Concepto	Año 1	Año 2	Año 3
Reducción de errores (%)	25%	35%	45%
Ahorro por reducción de errores (COP)	3,600,000	5,040,000	6,480,000
Ahorro en materiales reportes (COP)	3,000,000	3,000,000	3,000,000
Mejora eficiencia operativa (%)	5%	7%	10%
Beneficio por eficiencia (COP)	5,700,000	7,980,000	11,400,000
Ahorro total anual (COP)	12,300,000	16,020,000	20,880,000

Tabla 17. Proyecciones económicas a 3 años. (Elaboración propia)

Concepto	Año 1	Año 2	Año 3	Acumulado
Inversión anual (COP)	3,700,000	1,100,000	1,100,000	5,900,000
Ahorro total anual (COP)	12,300,000	16,020,000	20,880,000	49,200,000
ROI neto acumulado (COP)	8,600,000	23,320,000	42,500,000	42,500,000

Tabla 18. ROI estimado acumulado. (Elaboración propia)

5.3.4 Selección de tecnologías recomendadas.

A partir de la evaluación técnica y económica realizada, se identifican dos tecnologías clave para una primera fase de implementación en Bordatodo:

1. **Registro digital de producción en Excel:** Esta herramienta permitirá registrar en tiempo real la producción diaria, combinando datos provenientes de la máquina (tiempos de ejecución) con los tiempos de las operaciones manuales obtenidos mediante MTM. Con esta información, se diseñará una matriz de desempeño que calculará automáticamente indicadores como eficiencia operativa, tiempos de ciclo y tasa de producción, permitiendo a la empresa visualizar y analizar su rendimiento día a día.
2. **Aplicación de códigos QR:** Como complemento al registro digital, se podrán utilizar códigos QR para identificar lotes de producción, facilitando la trazabilidad del proceso desde la carga del diseño hasta el control de calidad y embalaje. Esta tecnología es de bajo costo, fácil implementación y representa un primer paso hacia una trazabilidad inteligente.

Estas soluciones están alineadas con las capacidades actuales de la empresa, no requieren inversiones elevadas y constituyen una base sólida para la futura integración de tecnologías más complejas.

5.3.5 Conclusión y recomendaciones finales

La evaluación técnica y económica realizada en esta sección confirma que Bordatodo cuenta con las condiciones necesarias para iniciar una transformación digital gradual y estratégica, basada en soluciones tecnológicas accesibles y de alto impacto. En esta primera fase, la implementación de un sistema de registro digital en Excel y la estandarización de tiempos mediante el método MTM constituyen avances significativos. Estas herramientas permiten visualizar KPIs en tiempo real, identificar cuellos de botella y establecer una línea base operativa confiable para la toma de decisiones.

La experiencia adquirida durante esta etapa inicial sienta las bases para una cultura organizacional orientada al dato, a la mejora continua y al control efectivo del rendimiento productivo. Además, facilita la transición hacia herramientas más avanzadas sin necesidad de una disrupción inmediata o inversiones elevadas.

En este contexto, se recomienda consolidar estos avances mediante una prueba piloto de al menos una semana, utilizando el sistema de Excel para registrar la producción diaria, calcular automáticamente la eficiencia operativa y validar la utilidad de los KPIs generados. Esta prueba permitirá:

- Ajustar la matriz de datos según la operativa real.
- Capacitar al personal en el uso de la herramienta.
- Detectar brechas en la recolección y análisis de información.

Simultáneamente, se destaca el potencial estratégico de implementar códigos QR como siguiente fase del roadmap. Aunque no fueron aplicados en esta etapa, su viabilidad

económica y operativa ya fue analizada. Esta tecnología representa un puente natural hacia la automatización parcial, permitiendo mejorar la trazabilidad por lote, reducir pérdidas por errores de identificación y facilitar futuras integraciones con sistemas digitales más robustos.

En suma, Bordatodo ha completado una etapa fundamental hacia la digitalización de su proceso productivo. El uso de Excel y MTM no solo mejora la eficiencia inmediata, sino que marca el inicio de un proceso escalable, donde cada avance se construye sobre bases sólidas y medibles. La incorporación futura de tecnologías como los códigos QR fortalecerá aún más este proceso, permitiendo a la empresa avanzar con decisión hacia un modelo de operación más inteligente, trazable y competitivo.

5.4 Diseño de un roadmap de implementación tecnológica progresiva.

Una vez completada la evaluación técnica y económica de tecnologías aplicables en el contexto operativo de Bordatodo, y habiendo implementado una solución inicial basada en herramientas accesibles como Microsoft Excel para el registro digital y visualización de indicadores clave, se hace necesario trazar una hoja de ruta que guíe la transición de la empresa hacia una integración más profunda con tecnologías de la Industria 4.0. Este roadmap busca articular un plan escalonado, sostenible y adaptado a las capacidades actuales y proyecciones de crecimiento de la empresa, permitiendo consolidar la digitalización iniciada y habilitar futuras etapas de automatización e inteligencia operativa.

5.4.1 Fase 1 – Implementación inicial: Registro digital y visualización operativa.

Se plantea como objetivo el diseño de un sistema de captura de datos y generación de indicadores de desempeño en tiempo real, utilizando herramientas de bajo costo y alta

adaptabilidad que se ajusten a las dinámicas operativas de la empresa sin comprometer su viabilidad económica.

- **Diseño de matriz digital de producción:** Se diseñó una matriz que centraliza la información diaria de producción, permitiendo organizar, sistematizar y visualizar los datos de manera eficiente extraídos del reporte de producción. La Tabla 17 muestra la estructura general de dicha matriz. Su estructura técnica detallada puede consultarse en el anexo A.

```
Sub CopiarYAlmacenarEnBD()
    Dim origen As Worksheet
    Dim destino As Worksheet
    Dim filaDestino As Long
    Dim ultimaFila As Long
    Dim i As Long
    Dim valor1 As Variant, valor2 As Variant
    Dim duplicado As Boolean

    ' Define las hojas
    Set origen = ThisWorkbook.ActiveSheet
    Set destino = ThisWorkbook.Sheets("BD")

    ' Captura los dos valores clave a comparar
    valor1 = origen.Range("P2").Value
    valor2 = origen.Range("O5").Value

    ' Revisión de duplicado desde la fila 3
    ultimaFila = destino.Cells(destino.Rows.Count, 2).End(xlUp).Row
    If ultimaFila < 3 Then ultimaFila = 2

    duplicado = False
    For i = 3 To ultimaFila
        If destino.Cells(i, 2).Value = valor1 And destino.Cells(i, 3).Value = valor2 Then
            duplicado = True
            Exit For
        End If
    Next i

    If duplicado Then
        MsgBox " Estos datos ya fueron guardados anteriormente.", vbExclamation
        Exit Sub
    End If

    ' Si no hay duplicado, guardar en siguiente fila
    filaDestino = ultimaFila + 1
```

```

' Guardar los 9 datos en columnas A ? I
destino.Cells(filaDestino, 1).Value = origen.Range("Q2").Value ' A
destino.Cells(filaDestino, 2).Value = origen.Range("P5").Value ' B
destino.Cells(filaDestino, 3).Value = origen.Range("V5").Value ' C
destino.Cells(filaDestino, 4).Value = origen.Range("W5").Value ' D
destino.Cells(filaDestino, 5).Value = origen.Range("X5").Value ' E
destino.Cells(filaDestino, 6).Value = origen.Range("Y5").Value ' F
destino.Cells(filaDestino, 7).Value = origen.Range("U5").Value ' G
destino.Cells(filaDestino, 8).Value = origen.Range("W2").Value ' H
destino.Cells(filaDestino, 9).Value = origen.Range("T2").Value ' I

MsgBox "Datos guardados correctamente en la hoja BD.", vbInformation
End Sub

```

Apéndice A. Estructura técnica de la matriz digital de producción. (Elaboración propia)

La matriz tiene como función recopilar la información de la medición de la productividad diaria teniendo en cuenta los minutos trabajados, los minutos disponibles, la producción realizada y la eficiencia respectivamente, esta información se guarda en una base de datos correspondiente a los valores suministrados en la Tabla 19.

FECHA	MAQUINA	UNIDADES	MINUTOS PRODUCIDOS	MINUTOS DISPONIBLES	EFICIENCIA	CAMBIOS DE DISEÑO	PUNTADAS DÍA	OPERADOR
12/05/25	Barudan 8	288	323	500	65%	11	1.668.300	-
13/05/25	Barudan 8	469	450	500	90%	4	2.560.900	-
14/05/25	Barudan 8	176	324	500	65%	1	1.936.000	-
15/05/25	Barudan 8	448	329	500	66%	6	1.784.400	-
16/05/25	Barudan 8	192	229	500	46%	8	1.017.800	-
17/05/25	Barudan 8	151	157	320	49%	5	830.100	-

Tabla 19. Matriz digital de producción diaria. (Elaboración propia)

- **Integración de tiempos MTM:** Se integraron los tiempos estándar MTM con los tiempos reales de ejecución de las máquinas, logrando reflejar con precisión los tiempos de ciclo reales y operativos. El anexo B ilustra cómo se realizó esta integración en la matriz

FECHA	12-may-25	OPERADOR	Leo	PUNTADAS DÍA	1.668.300
-------	-----------	----------	-----	--------------	-----------

MAQUINA	TIEMPO MAQUINA	RECOLECCIÓN- ALIMENTACIÓN	C.CARRETEL	G.DISEÑO	CAMBIOS DE DISEÑO	UNIDADES PRODUCIDAS	MINUTOS PRODUCIDOS	MINUTOS DISPONIBLES	EFICIENCIA
Barudan 8	267	22,23	22,52205	10,8	11	288	323	500	65%

GUARDAR

TIEMPOS ESTANDAR (MTM)		
OPERACIÓN	1	2
R&A	1,14	0,57
C.CARRETEL	0,27	0,27
G.DISEÑO	0,98	0,98

Apéndice B. Medición automatizada del proceso diario. (Elaboración propia)

Esta información es extraída del reporte de producción, el cual nos permite calcular tanto el tiempo efectivo en máquina, como las operaciones manuales que se han realizado durante el proceso dependiendo del día a evaluar.

- **Validación con datos reales:** Alimentación de la matriz con datos reales una semana de producción, permitiendo validar el funcionamiento del sistema y obtener una línea base confiable. En el anexo C se presenta un fragmento del registro real utilizado para esta validación.

 REPORTE DE PRODUCCIÓN SEMANAL								
FECHA	MAQUINA	CLIENTE	NOMBRE DEL BORDADO	PUNTADAS	CANTIDAD	RPM	OPERARIO	AUXILIAR
12-may-25	Barudan 8	Robert	Carnes Frente	15.600	28	850	Leo	Eliza
12-may-25	Barudan 8	Robert	Carnes Espalda	16.000	7	850	Leo	Eliza
12-may-25	Barudan 8	Yolanda	New Ser	7.600	32	850	Leo	Eliza
12-may-25	Barudan 8	Yolanda	Sud Nser	2.700	20	850	Leo	Eliza
12-may-25	Barudan 8	Robert	America	3.800	44	850	Leo	Eliza
12-may-25	Barudan 8	Robert	Mapa adulto	3.600	32	850	Leo	Eliza
12-may-25	Barudan 8	Robert	Lecop Negras	4.400	44	850	Leo	Eliza
12-may-25	Barudan 8	Robert	Lecop Blanco	5.200	32	850	Leo	Yefer
12-may-25	Barudan 8	Robert	America Niño	3.500	21	850	Leo	Yefer
12-may-25	Barudan 8	Robert	Mapa Niño	3.100	14	850	Leo	Yefer
12-may-25	Barudan 8	Robert	Lecop Niño	4.500	14	850	Leo	Yefer
13-may-25	Barudan 8	Robert	Lecop Niño	3.700	21	850	Leo	Yefer
13-may-25	Barudan 8	Alex	Colombia	7.000	136	850	Leo	Yefer
13-may-25	Barudan 8	Alex	Adidas flor	2.200	136	850	Leo	Yefer
13-may-25	Barudan 8	Alex	Colombia	7.000	176	850	Leo	Yefer
14-may-25	Barudan 8	Gloria	Farallones	11.000	176	850	Leo	Eliza
15-may-25	Barudan 8	Gloria	Farallones	11.000	24	850	Leo	Yefer
15-may-25	Barudan 8	Beto	Chulo	3.200	17	850	Leo	Yefer
15-may-25	Barudan 8	Beto	Adidas	2.800	23	850	Leo	Yefer
15-may-25	Barudan 8	Alex	Colombia	7.000	32	850	Leo	Yefer
15-may-25	Barudan 8	Alex	Adidas	2.200	208	850	Leo	Yefer
15-may-25	Barudan 8	Alex	Colombia	5.000	144	850	Leo	Yefer

Apéndice C. Reporte de producción semanal. (Elaboración propia)

Este reporte de producción en la nube permite a los operadores ingresar datos en tiempo real desde cualquier dispositivo con conexión a internet. Al estar centralizado en una plataforma

digital, los dueños de la entidad o jefes del proceso pueden revisar simultáneamente la información actualizada, tomar decisiones inmediatas y dar seguimiento al desempeño de la producción sin necesidad de esperar reportes físicos o consolidaciones manuales.

- **Visualización automática de indicadores clave (KPIs):** La Figura 7 presenta la nueva dashboard de indicadores clave, diseñada para ofrecer una visualización integral y en tiempo real del desempeño operativo. A diferencia de versiones anteriores que mostraban únicamente algunos KPIs básicos, esta nueva interfaz reúne múltiples métricas esenciales, incluyendo:
 - Eficiencia operativa diaria
 - Unidades producidas
 - Minutos trabajados
 - Número de puntadas por día



Figura 7. Dashboard (Elaboración propia)

Además, la dashboard incorpora valores objetivo (targets) que representan:

- La eficiencia promedio esperada
- La facturación acumulada
- El número de cambios de estilo realizados

Estos indicadores se actualizan automáticamente con cada registro de producción ingresado por los operadores en la base de datos, lo que garantiza que la información esté siempre al día sin intervención manual.

Adicionalmente, el sistema cuenta con un centro de control interactivo, que permite aplicar filtros dinámicos según criterios específicos, facilitando el análisis por fecha, operador, estilo, máquina, entre otros. Esta visualización robusta permite a Bordatodo:

- Identificar patrones de desempeño
- Detectar cuellos de botella operativos
- Comparar los resultados reales contra los objetivos
- Mejorar la toma de decisiones, la planificación y la productividad de manera sostenible

5.4.1.1 Estimación de tiempo:

- 2 a 3 semanas (diseño, prueba piloto y ajustes finales)

5.4.1.2 Indicadores de éxito:

- 100% de registros digitalizados por turno
- Al menos 90% de cumplimiento en el ingreso diario de datos
- Reportes automáticos disponibles al cierre de cada jornada

5.4.1.3 Riesgos identificados:

- Errores en el ingreso de datos por falta de familiaridad

5.4.1.4 Plan de contingencia:

- Realizar capacitación práctica y material de consulta rápida
- Implementar doble validación durante la primera semana de uso
- Supervisión activa por parte del responsable de producción

Con el fin de dar seguimiento a las acciones implementadas para la transición del reporte manual al digital, se elaboró un cronograma que refleja cada una de las etapas desarrolladas, desde el diagnóstico inicial hasta la implementación del nuevo sistema. Este cronograma permite visualizar el orden, la duración y la relación entre las actividades realizadas. El detalle de dicho cronograma se presenta en el Anexo D.

MES DE MAYO DEL 2025				
CRONOGRAMA SEMANAL DE PRODUCCION				
DÍA	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES
ACTIVIDAD CLAVE	- Revisión del archivo actual en computador - Validación de campos útiles: puntadas, RPM, operador, auxiliar, etc. - Detección de vacíos o errores frecuentes	- Definición de protocolo único para el registro -Asignación de responsabilidades (quién registra y cuándo) - Elaboración de guía simple para diligenciamiento	- Capacitación práctica para operarios y auxiliares - Simulación de casos reales con registro en vivo - Resolución de dudas y errores comunes	- Implementación formal del protocolo - Cada operador diligencia su producción en tiempo real - Monitoreo y acompañamiento
INVOLUCRADOS	Jefe de producción Diseñador	Diseñador Jefes Operadores	Diseñador Operadores-Auxiliares	Operadores Diseñador-Jefe de producción
FASE CIERRE	Diagnóstico digital Línea base Estandarización	Flujo de datos Roles definidos Documentación	Formación aplicada Errores frecuentes Registro correcto	Ejecución digital Control en sitio Seguimiento activo

Apéndice D. Cronograma semanal de producción (Elaboración propia).

5.4.2 Fase 2 – Optimización operativa y estandarización digital.

Durante la semana de análisis, se identificó que el día 13 de mayo de 2025 presentó la mejor eficiencia operativa (90%), con baja frecuencia de cambios de estilo, evidenciando que reducir intervenciones manuales mejora el flujo operativo.

Frente a estos hallazgos, se proponen tres líneas de acción:

- Capacitación del personal en el uso y mantenimiento del sistema digital.
- Estandarización del empalme entre turnos usando formatos digitales compartidos.
- Evaluación del impacto de los cambios mediante los KPIs establecidos.

5.4.2.1 Estimación de tiempo:

- 1 mes (incluye diseño de formatos, capacitación y evaluación inicial)

5.4.2.2 Indicadores de éxito:

- Al menos un 10% de mejora en la eficiencia semanal promedio
- Reducción del 50% en los errores de empalme documentados
- 100% del personal capacitado en el uso del sistema

5.4.2.3 Riesgos identificados:

- Desalineación entre turnos o falta de seguimiento de formatos
- Rotación de personal no entrenado

5.4.2.4 Plan de contingencia:

- Crear una política clara de registro obligatorio de empalmes
- Capacitación continua y checklists visuales

5.4.3 Fase final – Integración inteligente y automatización progresiva.

La última etapa propuesta en este roadmap tiene un carácter propositivo y estratégico, ya que no contempla un desarrollo inmediato dentro del alcance del presente trabajo. Su propósito es ofrecer al lector una visión clara y estructurada del camino que la empresa podría seguir en el mediano plazo para avanzar hacia una gestión de producción completamente digitalizada y conectada, una vez consolidadas las fases anteriores.

A partir de la digitalización de registros, la estandarización operativa y la consolidación de indicadores clave, se propone una fase de integración progresiva de tecnologías asociadas al Internet de las Cosas (IoT) y al análisis de datos automatizado. Esta integración buscaría incorporar sensores básicos en las máquinas bordadoras para capturar en tiempo real variables como la velocidad de operación, los ciclos completados y la aparición de fallas o interrupciones. Dichos datos alimentarían de forma automática una plataforma de visualización tipo dashboard, construida en herramientas accesibles como Power BI, lo cual permitiría a los distintos niveles de la organización monitorear el estado operativo de la planta con mayor agilidad y precisión.

Dentro de esta fase, se identifica como elemento clave en la transición hacia una digitalización escalonada la implementación de códigos QR para el seguimiento de lotes de producción. Esta herramienta permitiría codificar digitalmente la información crítica de cada orden (como tipo de diseño, cliente, referencia, operador responsable y fecha de programación), facilitando su trazabilidad desde el inicio hasta la finalización del proceso.

El escaneo de estos códigos a lo largo de las distintas estaciones de trabajo no solo agiliza el flujo de información, sino que también permite asociar los datos de rendimiento directamente con cada lote, fortaleciendo la medición de eficiencia y reduciendo errores de registro. Esta funcionalidad es de bajo costo, altamente adaptable y constituye una base sólida para la futura integración con sistemas tipo MES o ERP.

Asimismo, se contempla la implementación de alarmas visuales o semáforos de desempeño directamente en planta, facilitando la identificación oportuna de desviaciones en la eficiencia, mejorando la toma de decisiones en el momento y fortaleciendo la autonomía del personal operativo. A partir de los datos recopilados, también sería posible automatizar alertas de mantenimiento preventivo, reduciendo tiempos improductivos y anticipando fallas técnicas.

En una etapa posterior y con base en la información generada, se sugiere el desarrollo de un modelo predictivo simple que permita anticipar el rendimiento esperado en función de variables tales como el diseño bordado, el operador asignado, el tipo de material y la carga de trabajo. Este modelo facilitaría una planificación más eficiente de la producción y podría integrarse eventualmente a plataformas de gestión más completas.

Finalmente, se propone evaluar un sistema tipo MES adaptado a las capacidades de una pyme, para centralizar los módulos desarrollados y avanzar hacia una gestión industrial digitalizada. Su implementación dependerá de la consolidación operativa, técnica y financiera de la empresa, por lo que se considera una meta a mediano o largo plazo.

5.4.4 Síntesis del roadmap

Para sintetizar el enfoque metodológico de este roadmap, se presenta a continuación un resumen de las fases propuestas para una adopción tecnológica escalonada y sostenible (ver Tabla 18).

Fase	Propósito principal	Resultados esperados
1. Implementación inicial: Registro digital y visualización operativa	Digitalizar los registros de producción y facilitar el acceso a la información básica mediante formatos digitales accesibles.	Mejora en la trazabilidad, reducción de errores manuales y visibilidad operativa básica.
2. Optimización operativa y estandarización digital	Estandarizar procesos, capacitar al personal y construir indicadores confiables de eficiencia y producción.	Reducción de variabilidad, mayor control del proceso y toma de decisiones basada en datos.
3. Integración inteligente y automatización progresiva	Integrar sensores, dashboards, alertas visuales, códigos QR y monitoreo predictivo para conectar el sistema productivo y preparar el camino hacia plataformas MES.	Transición hacia una operación conectada, con trazabilidad completa, gestión predictiva y posibilidad de escalar hacia sistemas inteligentes.

Tabla 18. Roadmap de implementación tecnológica progresiva. (Elaboración propia)

La integración de esta fase final responde al cumplimiento del objetivo general de diseñar un roadmap de implementación tecnológica progresiva adaptado a la empresa, que considere no solo las fases de adopción ya desarrolladas, sino también las estimaciones de inversión futura, los requerimientos técnicos y la estructura necesaria para monitorear el impacto real de las tecnologías sobre los procesos e indicadores clave. En conjunto, las tres fases presentadas conforman una metodología estructurada, viable y coherente con las capacidades actuales de la organización. Esta hoja de ruta permite a la empresa transitar de forma ordenada hacia un modelo de producción más eficiente, conectado y preparado para los desafíos de la Industria 4.0.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

6.1 Discusión de hallazgos

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que es posible diseñar e implementar una estrategia tecnológica progresiva en una microempresa del sector textil como Bordatodo, partiendo de herramientas accesibles como Excel y evolucionando hacia tecnologías propias de la Industria 4.0. La creación de un sistema digital para el registro y monitoreo de indicadores, la integración de tiempos estándar con datos reales, y la construcción de una hoja de ruta escalonada permiten validar la viabilidad técnica y económica de una transformación digital basada en gradualidad, adaptabilidad y bajo costo.

El análisis de impacto evidenció mejoras operativas significativas con una proyección de ahorro acumulado de hasta COP \$42.5 millones en tres años, fundamentado en la reducción de errores de producción, disminución de gastos materiales, y mejora en eficiencia operativa. Estos resultados coinciden con estudios previos, como el caso de Supertex Group, donde se logró una mejora del 10% en eficiencia tras la adopción de herramientas digitales básicas. Asimismo, se alinean con literatura como la de Kagermann et al. (2013), que destaca que las PYMEs pueden lograr altos beneficios con pequeñas inversiones digitales si estas son correctamente contextualizadas.

En cuanto a las limitaciones del estudio, es importante destacar que se trata de un análisis basado en un único estudio de caso, lo cual restringe la generalización de los hallazgos a otras realidades empresariales. Adicionalmente, la empresa no contaba con sistemas de información previos, lo que obligó a construir una línea base de desempeño a partir de una semana específica, reduciendo la posibilidad de hacer proyecciones con mayor robustez

estadística. También se deben considerar los ajustes metodológicos durante el proceso, como la sustitución de entrevistas estructuradas por comunicación directa con la gerencia, lo cual pudo limitar la amplitud del análisis cualitativo. Por último, aunque se validaron los beneficios de las soluciones propuestas mediante simulaciones y análisis de datos reales, su implementación total, especialmente en lo referente a tecnologías como IoT o códigos QR, quedó sujeta a fases futuras, por lo que los beneficios económicos deben entenderse como estimaciones basadas en condiciones ideales proyectadas.

6.3 Implicaciones prácticas

Pese a sus limitaciones, el modelo propuesto ofrece un alto potencial de aplicación en otras micro y pequeñas empresas manufactureras, especialmente en aquellas con bajo nivel de digitalización, recursos financieros limitados y procesos intensivos en mano de obra. Su enfoque modular, el uso de herramientas económicas y su diseño escalonado permiten adaptar la estrategia según el nivel de madurez digital y capacidad operativa de cada empresa.

Además, la estructura del roadmap dividida en fases claras con tiempo

s estimados, riesgos identificados, KPIs específicos y proyecciones de retorno facilita su replicabilidad como herramienta de planificación tecnológica. Este enfoque puede ser útil para entidades públicas o privadas interesadas en programas de fortalecimiento empresarial en sectores tradicionales.

6.4 Contribuciones teóricas

Desde el punto de vista académico, este trabajo contribuye a la literatura sobre transformación digital en PYMEs al presentar un modelo metodológico completo que integra

evaluación técnica, validación económica, simulación de impacto y diseño de una hoja de ruta adaptable. Aporta evidencia sobre cómo pueden aplicarse conceptos como el Internet de las Cosas, el control digital de procesos y la gestión por indicadores, incluso en empresas sin experiencia previa en tecnología industrial.

Además, refuerza el enfoque mixto como herramienta útil para abordar problemas reales de implementación tecnológica, combinando datos cuantitativos (tiempos, indicadores, simulaciones) con comprensión cualitativa del entorno organizacional.

6.5 Recomendaciones futuras

Como líneas de investigación emergentes, se sugieren:

- Desarrollar estudios comparativos entre varias PYMEs que apliquen este modelo, para ampliar su validez y ajustar su estructura según diferentes sectores.
- Integrar plataformas tipo MES de código abierto para ampliar las funcionalidades del sistema y evaluar su impacto en términos de trazabilidad completa.
- Estudiar los efectos del cambio cultural en los procesos de transformación digital en microempresas, incluyendo resistencia al cambio, apropiación tecnológica y autonomía operativa.
- Analizar el rol del acompañamiento externo (consultorías, universidades, incubadoras) en la aceleración de la madurez digital de las PYMEs.

REFERENCIAS

- Mecking, S. (2024). Barriers to technological innovation in SMEs: quantitative analysis of investment barriers and strategic decisions (Master's thesis, University of Twente).
- Tang, G., Park, K., Agarwal, A., & Liu, F. (2020). Impact of innovation culture, organization size and technological capability on the performance of SMEs: The case of China. *Sustainability*, 12(4), 1355.
- Botta, J. M., Genlot, F., & Rodríguez Masip, M. M. (2020). PyMEs eficientes: análisis técnico-económico para la automatización de procesos de empaquetado.
- Muñoz-Pinzón, D. S., Valencia-Rivero, K. T., Caviativa-Castro, Y. P., & Castillo-Bustos, J. S. (2024). Estado actual de la adopción de la industria 4.0 en pymes colombianas: desafíos y oportunidades. *Revista Politécnica*, 20(39), 99–118.
- Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (2024). Encuesta de opinión industrial conjunta.
- Siemens. (2022). Latin American Digital Transformation Index: Benchmarking digital maturity across the region. Siemens AG.
- Del Val Román, J. L. (2016). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. Valencia: Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática, Informes CODDII.
- Bartodziej, C. J. (2017). El concepto de industria 4.0. Un análisis empírico de tecnologías y aplicaciones en la logística de producción. Berlín: Springer.
- Tao, F., Zuo, Y., Xu, L. y Zhang, L. (2014). Percepción inteligente basada en IoT y acceso a recursos de manufactura hacia la manufactura en la nube”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* , 10 (2), 1547–1557.
- Ramírez, Y. y López, V. (2017). La creatividad, las inteligencias múltiples y el rendimiento escolar a través de las áreas instrumentales en 1º y 2º de la Educación Secundaria Obligatoria (eso). Talinorea: Revista talento, inteligencia y creatividad, 4(7).
- Almada, L. (2016). La revolución de la Industria 4.0 y el futuro de los Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES). *Journal of Innovation Management* , JIM 3, 4 16-21.
- ANDI. (2017). Informe de resultados sobre el estado de la transformación digital en Colombia. Asociación Nacional de Empresarios de Colombia.
- Dilber Ulas, et al. (2019). La transformación digital como cambio estratégico y no solo tecnológico. *Journal of Business Research*.

McFarlane, D., et al. (2022). A framework for supporting digital needs in small manufacturing firms. *Journal of Manufacturing Systems*.

McFarlane, D., et al. (2024). Low-cost digitalisation for small firms: simplicity, cost-effectiveness, and modularity. *Manufacturing Letters*.

Norma ETT, et al. (2016). Impact of Industry 4.0 on manufacturing: operational efficiencies and beyond. *Journal of Industrial Engineering*.

Patel, R. (2015). Time study for cycle time optimization in manufacturing settings. *International Journal of Production Management*.

Schönfuß, B., et al. (2020). Digital manufacturing on a shoestring: collaborative approaches in SMEs. *Procedia Manufacturing*.

Telukdarie, A., et al. (2023). Digital priorities in South African SMEs: systems and determinants. *African Journal of Business Technology*.

Tramboulidis, S., et al. (2019). Integration of IoT-based time measurement tools in assembly processes. *Sensors and Actuators Journal*.

Yazdi, P. G., et al. (2018, 2019). System downtime and productivity: optimizing performance with digital methods. *Computers in Industry*.

BBVA. (2024). Las pymes: columna vertebral de la economía colombiana. BBVA Research.

Benítez, G. B. (2022). Digital transformation and platform ecosystems in Industry 4.0. *Journal of Industrial Technology*.

Coli, E. (2019). Métodos de medición del trabajo en el diseño de entornos laborales eficientes. *Journal of Work Studies*.

Dilber, U., & Calipinar, H. (2013). The advantages of SMEs in dynamic markets. *Small Business Journal*.

Turgeon, T. J. (2019). Industry 4.0 platforms and the network effect in manufacturing. *International Journal of Industrial Strategy*.

Parra, D. T., Talero-Sarmiento, L. H., Ortiz, J. D., & Guerrero, C. D. (2021). Technology readiness for IoT adoption in Colombian SMEs. *Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2022). *Metodología de la investigación* (7ª ed.). McGraw-Hill.

Cameron, K. S., & Quinn, R. E. (2011). *Diagnosing and Changing Organizational Culture: Based on the Competing Values Framework* (3rd ed.). Jossey-Bass.

Imai, M. (2012). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill.

MTM Ingenieros. (s.f.). *Tablas MTM -1* [PDF].

García Sánchez, A. (2022). *La integración de los sistemas inteligentes y las TIC en la optimización de recursos productivos de las industrias 4.0: Una revisión sistemática*. Universidad Nacional de Trujillo.

Kane, G. C., Palmer, D., Phillips, A. N., Kiron, D., & Buckley, N. (2015). *Strategy, not technology, drives digital transformation*. MIT Sloan Management Review and Deloitte University Press.

Piderit, S. K. (2000). Rethinking resistance and recognizing ambivalence: A multidimensional view of attitudes toward an organizational change. *Academy of Management Review*, 25(4), 783–794.

APÉNDICES

Apéndice A. Estructura técnica de la matriz digital de producción. (Elaboración propia)	65
Apéndice B. Medición automatizada del proceso diario. (Elaboración propia).....	66
Apéndice C. Reporte de producción semanal. (Elaboración propia)	67
Apéndice D. Cronograma semanal de producción (Elaboración propia).	70