



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS IOT PARA MEDICIÓN DE
CONSUMO ELÉCTRICO COMO INDICADOR DE PRODUCTIVIDAD EN PYMES**

POR

Jaime Ignacio San Martin Torres

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero(a) Civil Electrónico(a)

Profesor Guía
Pablo Aqueveque Navarro

Agosto 2023
Concepción (Chile)

©2023 Jaime Ignacio San Martin Torres

©2023 Jaime Ignacio San Martín Torres

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

A mi familia. De quienes nunca he dejado de aprender.

Gracias por tanto.

Agradecimientos

Quiero empezar expresando mi más sincero agradecimiento a mis padres y mi hermana por su apoyo inquebrantable a lo largo de los años. También quiero agradecer a Paula por acompañarme y alentarme cada vez que tenía la oportunidad.

Agradezco enormemente a mi profesor guía, el Dr. Pablo Aqueveque Navarro, por su constante ayuda, consejos y, sobre todo, su paciencia. Igualmente, quiero agradecer al profesor Dr. Enrique Germany Morrison por toda la colaboración que tuve el privilegio de compartir con él.

A todos los miembros del equipo del IDS Lab y del C4i, quiero expresar mi gratitud por su apoyo constante, su disposición para brindar ayuda y por las conversaciones amenas y divertidas que compartimos.

Sumario

En el presente estudio, se abordó la implementación de Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs) en la industria manufacturera de pequeñas y medianas empresas (Pymes) en la región, conforme a la normativa ISO 22400. La investigación reveló una marcada brecha tecnológica en las Pymes, caracterizada por la utilización de maquinaria obsoleta y una notable ausencia de digitalización, constituyendo un desafío considerable en la transición hacia la Industria 4.0.

Para enfrentar estos retos, se diseñó e implementó un sistema de monitoreo de consumo eléctrico basado en IoT en una empresa metalmeccánica seleccionada. Los resultados obtenidos proporcionaron una perspectiva detallada de los procesos de producción, incluyendo métricas como la eficiencia del trabajador y la eficiencia de utilización. Además, se examinó el factor de potencia, con posibles implicancias en la tarificación eléctrica.

No obstante, la investigación también identificó obstáculos significativos, como la resistencia al cambio, la complejidad en la implementación de tecnologías emergentes, y la carencia de recursos y conocimientos técnicos en muchas Pymes.

La solución propuesta representa un avance significativo hacia la transformación digital en la industria manufacturera de Pymes. Sin embargo, la adaptación de las tecnologías a las realidades específicas de las Pymes, junto con una educación y apoyo continuos, será esencial para el éxito a largo plazo.

En resumen, esta memoria de título busca ofrecer una visión general de la realidad de las Pymes en la región y ha planteado una solución viable para avanzar hacia una mayor eficiencia y tecnologización. Aunque existen desafíos por enfrentar, con el enfoque y la colaboración adecuados, la transformación digital en la industria manufacturera de Pymes es una meta alcanzable y fundamental para su competitividad en el mercado global.

Summary

In the present study, the implementation of Key Performance Indicators (KPIs) in the manufacturing industry of small and medium-sized enterprises (SMEs) in the region was addressed, in accordance with ISO 22400 standards. The research revealed a pronounced technological gap in SMEs, characterized by the use of outdated machinery and a notable absence of digitization, constituting a considerable challenge in the transition to Industry 4.0.

To tackle these challenges, an IoT-based electrical consumption monitoring system was designed and implemented in a selected metalworking company. The results obtained provided a detailed perspective on production processes, including metrics such as worker efficiency and utilization efficiency. Additionally, the power factor was examined, with potential implications in electrical tariffing.

However, the research also identified significant obstacles, such as resistance to change, complexity in the implementation of emerging technologies, and a lack of resources and technical knowledge in many SMEs.

The proposed solution represents a significant advancement towards digital transformation in the manufacturing industry of SMEs. Nevertheless, the adaptation of technologies to the specific realities of SMEs, along with continuous education and support, will be essential for long-term success.

In summary, this thesis aims to provide an overview of the reality of SMEs in the region and has proposed a viable solution to move towards greater efficiency and technological advancement. While challenges exist to be faced, with the right focus and collaboration, digital transformation in the manufacturing industry of SMEs is an achievable and essential goal for their competitiveness in the global market.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	iv
Sumario	v
Summary	vi
Tabla de contenidos	vii
Lista de Tablas	ix
Lista de Figuras.....	x
1. Introducción	1
1.1. Introducción general.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Alcances y limitaciones.....	4
1.5. Trabajos Previos.....	4
1.6. Temario y metodología	6
2. Marco Conceptual	8
2.1. Industria 4.0.....	8
2.2. Internet de las Cosas (IoT)	9
2.3. Indicador clave de desempeño (KPI)	11
2.4. ISO 22400	12
2.4.1. Modelo de Jerarquía Funcional.....	12
2.4.2. Modelo de Jerarquía de Equipos	13
2.4.3. Administración de Operaciones de Manufactura (MOM)	13
3. Caracterización del sector industrial regional	17
3.1. Rubros y capacidad de manufactura	18

4.	Selección y estrategia de implementación de KPIs.....	21
4.1.	Paso 1: Identificar el proceso a evaluar.....	21
4.2.	Paso 2: Determinar objetivos	22
4.3.	Paso 3: Describir las acciones operativas.....	23
4.4.	Paso 4: Determinar elementos y seleccionar KPIs.....	24
4.5.	Paso 5: Evaluar desempeño.....	29
4.6.	Paso 6: Realización de acciones en favor de las expectativas	30
5.	Solución propuesta para adquisición de datos	31
5.1.	Sistema de monitoreo de consumo eléctrico para levantamiento de KPIs.....	31
5.1.1.	Primeros diseños de concepto	32
5.1.2.	Fabricación de prototipo	33
5.1.3.	Implementación del prototipo en la industria.....	35
6.	Resultados	38
6.1.	Trabajos futuros	41
7.	Conclusiones	42
8.	Referencias.....	44

Lista de Tablas

Tabla 2.1: KPIs y su clasificación según ISO22400.....	15
Tabla 2.2: Estructura de la descripción de un KPI según ISO 22400.....	16
Tabla 3.1: Presencia de herramientas por rubro.....	19
Tabla 4.1: Tabla propuesta para registro de objetivos específicos	23
Tabla 4.2: KPI Eficiencia del trabajador.....	26
Tabla 4.3: KPI Índice de producción	26
Tabla 4.4: KPI Eficiencia de asignación.....	26
Tabla 4.5: KPI Eficiencia de utilización	27
Tabla 4.6: KPI Índice de eficiencia general de los equipos	27
Tabla 4.7: KPI Disponibilidad	27
Tabla 4.8: KPI Índice de Calidad.....	28
Tabla 4.9: KPI Eficacia.....	28
Tabla 4.10: KPI Consumo total de energía.....	28
Tabla 4.11: KPI Tiempo promedio de falla	29
Tabla 5.1: Variables eléctricas desplegadas en pantalla local	35
Tabla 6.1: Consumo eléctrico y tiempos asociados a una jornada laboral	39

Lista de Figuras

Figura 2.1: Evolución de la industria.....	8
Figura 2.2: Analogía entre un lazo de control y la generación de un KPI.....	12
Figura 2.3: Diagrama jerarquía de equipos basada en roles, adaptada de IEC 62264-3.....	13
Figura 2.4: Modelo de administración de operaciones de manufactura	14
Figura 3.1: Aporte del sector manufacturero al PIB regional (miles de millones de pesos)	17
Figura 3.2: Distribución por rubro de la industria manufacturera regional	18
Figura 3.3: Actividades presentes en los procesos de manufactura regional.....	19
Figura 4.1: Pasos del método para la aplicación de KPIs basado en ISO22400.....	21
Figura 4.2: Objetivos generales más transversales en la Pyme manufacturera	25
Figura 5.1: Esquema representativo de la solución propuesta	32
Figura 5.2: Concepto de diseño a desarrollar como prototipo	32
Figura 5.3: Esquemáticos módulo de medición (1/3)	33
Figura 5.4: Esquemáticos módulo de medición (2/3)	33
Figura 5.5: Esquemáticos módulo de medición (3/3)	34
Figura 5.6: Diseño electrónico y renderizado del módulo de medición	34
Figura 5.7: Fabricación de PCB y ensamble del sistema prototipo	35
Figura 5.8: Implementación de sistema de monitoreo de consumo eléctrico	36
Figura 5.9: Interfaz local de monitoreo en operación	37
Figura 5.10: Operador de torno en tareas productivas.....	37
Figura 6.1: Gráfico de potencia activa utilizada en una jornada laboral	38
Figura 6.2: Energía activa y reactiva consumida en un mes de operación	40
Figura 6.3: Variación de factor de potencia durante un mes de operación.....	40

1. Introducción

1.1. Introducción general

El sector industrial manufacturero, especialmente las Pequeñas y Medianas Empresas (Pymes), desempeña un papel fundamental tanto en la economía a nivel regional como nacional. Estas Pymes se enfrentan a desafíos constantes para mantenerse competitivas en un entorno empresarial en constante evolución y cada vez más exigente, donde para lograr su supervivencia y crecimiento, es imprescindible que estas empresas mejoren sus niveles de productividad y eficiencia operativa. Una de las áreas clave para lograr estos objetivos es la gestión eficiente de los activos físicos, tales como maquinaria, equipos especializados o instalaciones de diversa complejidad. Estos representan una parte importante de los costos operativos de las Pymes. Optimizar la gestión de estos activos implica maximizar su disponibilidad, rendimiento y vida útil, al tiempo que se minimizan los costos asociados con su mantenimiento, reparación y reemplazo.

En este contexto, la adopción de tecnologías emergentes, como el Internet de las Cosas (IoT) y la aplicación de principios de la Industria 4.0, ha demostrado ser una oportunidad prometedora para mejorar la gestión de activos gracias a la digitalización de los procesos, apuntando a un ecosistema digital interconectado con la capacidad de ser monitoreado, lo que brinda a las empresas información valiosa para tomar decisiones informadas y estratégicas en términos de eficiencia y productividad.

Es así, como dentro de las tecnologías disponibles, el monitoreo del consumo eléctrico se alza como una alternativa de gran valor para la gestión de activos, facilitando el levantamiento de indicadores clave de rendimiento (KPI, por sus siglas en inglés) mediante la medición e interpretación de parámetros eléctricos. Estos KPI proporcionan métricas cuantitativas que permiten evaluar y mejorar la eficiencia operativa, la productividad y la sostenibilidad de las empresas.

Mediante el análisis de los datos de consumo eléctrico, se pueden establecer y monitorear KPI relevantes, como la eficiencia energética por unidad de producción, el consumo específico de energía, la utilización de equipos eléctricos y la carga óptima de los sistemas eléctricos. Estos indicadores permiten identificar áreas de mejora, establecer metas y realizar un seguimiento

continuo del desempeño energético en relación con los objetivos establecidos.

Sin embargo, a pesar del potencial de estas tecnologías, muchas Pymes enfrentan desafíos para implementar de manera efectiva sistemas IoT en la medición de consumo eléctrico. Además, existe una necesidad de contar con una guía práctica y basada en normas reconocidas internacionalmente para asegurar una implementación exitosa y coherente. En este sentido, la norma ISO 22400 sobre la integración de las llamadas Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en la gestión de activos físicos proporciona un marco sólido y reconocido a nivel mundial que puede servir como base para el diseño e implementación de sistemas IoT en las Pymes.

Por lo tanto, este estudio buscará exponer estrategias de implementación de sistemas IoT para la medición de consumo eléctrico como indicador de productividad en PYMES. Lo anterior en el marco del proyecto “*Manufactura Avanzada: Mayor productividad en PYMES*” que actualmente se encuentra en ejecución por el Centro para la Industria 4.0 de la Universidad de Concepción.

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente, las empresas de manufactura requieren una mayor integración de sus procesos con el objetivo de aumentar la coordinación y competitividad en un mercado cada vez más globalizado. Para lograr esto, es crucial ejecutar tareas de manera eficiente, coordinada y con trazabilidad, midiendo y controlando el rendimiento de las actividades ejecutadas. Esta medición y control son fundamentales para la toma de decisiones y la mejora continua de las empresas de manufactura, lo que les permite tener un impacto significativo con relación a sus competidores. [1].

En este sentido, los indicadores clave de desempeño (KPIs) son herramientas que permiten a las empresas medir el cumplimiento de sus objetivos y actividades, evaluando los procedimientos y realizando las correcciones necesarias. El uso de KPIs en la administración de operaciones de manufactura (MOM) es motivada por su capacidad para mejorar los procesos que agregan valor a una empresa, cuantificar aspectos de todas sus acciones y vigilar el logro de los objetivos de cada actividad [2].

Muchas empresas manufactureras se enfrentan a pérdidas que afectan la productividad y la capacidad competitiva, como la pérdida de materiales, el bajo rendimiento de equipos y mano de

obra, pérdidas de tiempo, entre otras. Por lo tanto, resulta vital para estas empresas medir el desempeño de sus procesos de negocio y sus objetivos, a fin de ser competitivas y sobrevivir en el mercado. Sin embargo, para lograrlo, es necesario contar con herramientas confiables para seleccionar y medir KPIs, de modo que sean útiles y causen un real impacto en sus procesos de manufactura.

El estándar ISO 22400 define términos, criterios y KPIs a nivel de MOM, sin imponer indicadores específicos o rangos de rendimiento mínimos, lo que brinda flexibilidad y permite su adaptación a diferentes procesos [3]. Además, propone una serie de pasos para la aplicación de KPIs en los procesos de manufactura. Sin embargo, estos pasos carecen de detalles específicos y no proporcionan orientación clara sobre cómo llevarlos a cabo.

Por lo tanto, es necesario desarrollar un método que facilite la aplicación de indicadores clave de desempeño, donde la integración de tecnologías propias de la industria 4.0 juega un papel fundamental en la adquisición y administración de datos a través de sistemas sensorizados, permitiendo la caracterización de los procesos y la obtención de información relevante para la mejora continua de las empresas manufactureras.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar un estudio sobre las estrategias de implementación de sistemas IoT para la medición de consumo eléctrico y su aplicación como indicador de productividad en Pymes.

1.3.2. Objetivos específicos

- Explorar los principios y requisitos de la norma ISO 22400.
- Identificar los indicadores clave de desempeño (KPIs) más relevantes y adecuados según los datos levantados provenientes de industrias locales, considerando la normativa ISO 22400 y otros estándares aplicables.
- Proponer un sistema IoT para la medición de consumo eléctrico en Pymes, considerando necesidades específicas, su tamaño, tipo de industria y objetivos de mejora de productividad.

1.4. Alcances y limitaciones

Los alcances del presente proyecto son:

- Se establece una metodología general de implementación de KPIs que utilizará como base de implementación lo establecido por el estándar ISO 22400.
- Se caracterizarán empresas Pyme manufactureras en base a información levantada por iniciativas FIC desarrolladas previamente.

Las limitaciones del presente proyecto son:

- Solo se trabajará con datos del sector industrial manufacturero de la región del Biobío.
- Solo se tendrán en cuenta el listado de KPIs proporcionado por la ISO 22400.
- Solo se compartirán generalidades sobre desarrollos de proyectos FIC en ejecución.
- Prototipo único piloteado en solo una empresa.

1.5. Trabajos Previos

En la revisión de los trabajos previos, se encontraron diversas investigaciones relacionadas con la implementación de indicadores clave de desempeño (KPIs) y sistemas de medición del rendimiento en el contexto de la Industria 4.0. A continuación, se presentan los principales hallazgos de cada uno de los trabajos revisados:

- ♣ C. Johnsson, «Key Performance Indicators Used as Measurement Parameter for Plant-Wide Feedback Loops», de *Advances in Production Management Systems*. 2014.

El autor realiza una analogía entre un lazo realimentado único y un lazo realimentado de la planta utilizando indicadores clave de desempeño descritos en ISO 22400 como parámetros de control. Propone un diseño de lazo de control realimentado de toda la planta para ajustar los KPIs al valor objetivo.

- ♣ V. Kermorgant y I. Manninen, «Implementing Web Analytics the Nokia Way: a Customer's Methodology», 2015.

Este trabajo presenta un procedimiento de implementación de KPIs para la gestión de páginas web. Define 11 pasos, destacando la forma de identificación de KPIs a través de la definición de objetivos micro, actores y frecuencia de reporte, para posteriormente asignar uno o varios KPIs que contribuyan al cumplimiento de los objetivos.

- ♣ C.-F. Lindberg, S. Tan, J. Yan y F. Starfelt, «Key performance indicators improve industrial performance», *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1785-1790, 2015.

Los autores sugieren diferentes tipos de KPIs para la industria y presentan un método para mejorar el rendimiento de los procesos mediante los mismos. El método se basa en la identificación de señales de proceso o combinaciones de estas que tienen una fuerte correlación con el KPI deseado. Se calcula el KPI a partir de estas señales y se realizan modificaciones mediante controladores para alcanzar el valor deseado. El método fue aplicado en una planta de cogeneración, generando sugerencias para mejorar la eficiencia de una caldera.

- ♣ F. Endrass, «Performance measurement using shop floor data», KTH Industrial Engineering and Management, Estocolmo, 2013.

Propone un enfoque basado en el ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar) para aplicar KPIs según el estándar ISO 22400. El enfoque consta de cinco etapas que involucran analizar la situación actual del proceso, definir objetivos, identificar y seleccionar medidas del estándar ISO 22400, implementar las medidas y realizar pruebas y revisiones para mejorar los procesos de manufactura.

- ♣ A. Behzadirad y F. Stenfors, «A study of key performance indicators (KPIs) at one of the production sites of Fresenius Kabi in Brunna, Sweden», KTH Industrial Engineering and Management, Estocolmo, 2015.

Este proyecto se enfoca en aplicar KPIs del estándar ISO 22400 para mejorar la productividad en una línea de producción específica de una empresa. Se inicia identificando las necesidades de la empresa y seleccionando seis KPIs. Luego, se realiza la recolección y cálculo de datos para analizar si los KPIs ayudan a mejorar el proceso. Solo dos de los seis KPIs resultaron ser medibles, aplicables y útiles para la empresa.

- ♣ T. Parkash, C. Meshram, C.-C. Lee, R. J. Ramteke y A. L. Imoize, «Performance Measurement System and Quality Management in Data-Driven Industry 4.0: A Review», *Sensors*, vol. 22, n° 1, p. 224, 2021.

El artículo analiza cómo las industrias manufactureras emplean diferentes estándares industriales para medir el rendimiento y garantizar la calidad de los productos y servicios en el contexto de la Industria 4.0. Asimismo, se revisan métodos actuales, estándares industriales y KPIs

utilizados en sistemas de medición del rendimiento en la Industria 4.0, y se estudian casos prácticos para comprender cómo las compañías de fabricación inteligente están aprovechando esta revolución industrial.

Además, el artículo aborda la digitalización de la calidad, denominada Calidad 4.0, y discute los desafíos y oportunidades de investigación en el entorno de la Industria 4.0. La comprensión de cómo se integran los estándares industriales y los sistemas de medición del rendimiento en la Industria 4.0 permite a las compañías optimizar sus operaciones, mejorar la calidad de los productos y fomentar la innovación en esta nueva era de la manufactura impulsada por datos.

En conclusión, la normativa ISO 22400 juega un papel crucial en la implementación de KPIs y sistemas de medición del rendimiento en la Industria 4.0. Su enfoque estructurado y estandarizado proporciona una base sólida para establecer y evaluar indicadores de manera efectiva. Además, el IoT representa una oportunidad valiosa para el levantamiento de indicadores en tiempo real y la obtención de datos más precisos, lo que mejora la eficiencia y la competitividad de las empresas en el contexto de la industria inteligente impulsada por datos. La combinación de la normativa ISO 22400 y el IoT abre un mundo de posibilidades para optimizar los procesos, mejorar la calidad de los productos y servicios, y mantener una ventaja competitiva en el panorama de la Industria 4.0.

1.6. Temario y metodología

La metodología propuesta para esta memoria de título se fundamenta en una serie de etapas clave que permitirán realizar un estudio en detalle sobre las estrategias de implementación de sistemas IoT para la medición de variables eléctricas y su aplicación como indicador de productividad. Estas etapas se describen a continuación:

En primer lugar, se realizará una revisión de literatura con el objetivo de recopilar y analizar investigaciones previas relacionadas con el uso de sistemas IoT en la industria y su impacto en la productividad de las empresas. Esta revisión permitirá establecer un marco teórico sólido y comprender las tendencias actuales en el campo.

Posteriormente, se diseñará el marco conceptual que integrará los fundamentos teóricos de IoT, indicadores clave de desempeño (KPIs) aplicados a la medición de consumo eléctrico y

conceptos relevantes de la Industria 4.0. Este marco teórico proporcionará la base para el desarrollo de la investigación y la comprensión de los conceptos clave involucrados.

Luego, se procederá a caracterizar el sector industrial manufacturero. Se recopilarán datos sobre su infraestructura, prácticas de gestión y factores relevantes para la productividad. La selección de empresas diversificadas permitirá obtener una muestra representativa y abarcar diferentes contextos.

Con los datos recopilados, se diseñará e implementará un sistema IoT personalizado para la medición de consumo eléctrico en las Pymes seleccionadas. Este sistema estará basado en las tecnologías y dispositivos más adecuados para cada empresa, considerando sus particularidades y necesidades específicas.

Una vez implementado el sistema IoT, se procederá al análisis y evaluación de los resultados obtenidos. Se compararán los indicadores de desempeño antes y después de la implementación para evaluar el impacto del sistema en la productividad de las Pymes. Esta etapa permitirá identificar mejoras y áreas de oportunidad.

Finalmente, se llevará a cabo la identificación de posibles barreras y desafíos durante la implementación del sistema IoT en las Pymes. A partir de esta identificación, se propondrán recomendaciones y estrategias para superar dichas barreras y maximizar los beneficios del sistema IoT en términos de eficiencia energética y productividad.

La metodología propuesta busca proporcionar una visión completa y precisa sobre el uso de sistemas IoT en la medición de consumo eléctrico y su impacto en la productividad de las Pymes. Al seguir estas etapas, se espera obtener resultados relevantes que contribuyan al conocimiento en este campo y aporten valor a las empresas que buscan mejorar su gestión energética y competitividad en el contexto de la Industria 4.0.

2. Marco Conceptual

2.1. Industria 4.0

La Industria 4.0 representa la cuarta revolución industrial, un fenómeno reciente impulsado por tecnologías emergentes como la Inteligencia Artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT), la computación en la nube, el machine learning (ML), y el análisis de big data. Estas tecnologías modernas están transformando los procesos de producción, permitiendo una mayor personalización, optimización, eficiencia y reducción de costos, además de ofrecer soluciones efectivas y mejorar la relación costo/beneficio [4].

En términos históricos, la evolución de la industria ha sido marcada por varias etapas. La Industria 1.0, que comenzó en 1784, se caracterizó por la energía de vapor y la mecanización. La Industria 2.0, que se produjo a fines del siglo XIX, se caracterizó por la electrificación de las fábricas y la producción en masa. La Industria 3.0, trajo consigo la introducción de las computadoras y la automatización en los procesos de fabricación. Por otro lado, el enfoque clave de la Industria 4.0 se centra en tecnología emergente que tendrá un gran impacto en los procesos de producción. Tecnologías innovadoras que incluyen la realidad virtual, impresión 3D, simulación, análisis de big data, computación en la nube, IoT, ciberseguridad, comunicación máquina a máquina, robots, drones, nanotecnología e inteligencia empresarial [5].

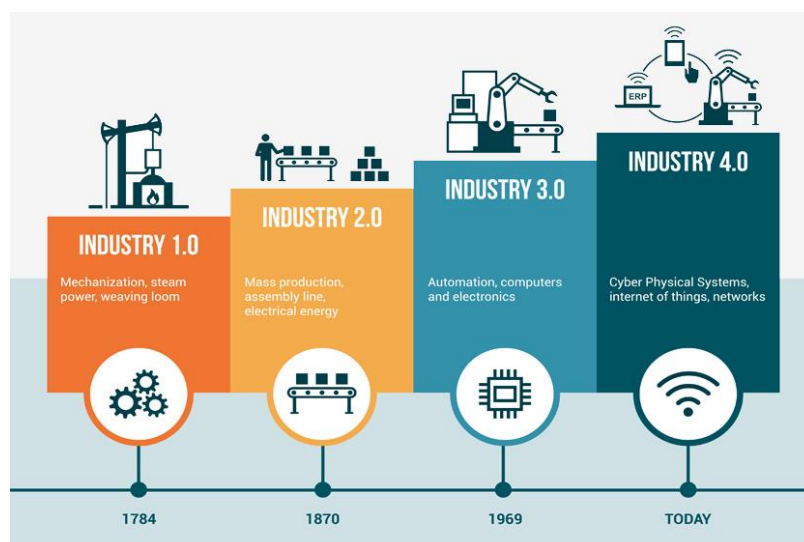


Figura 2.1: Evolución de la industria.

En el marco de la Industria 4.0, uno de los elementos centrales es el uso de IoT para desarrollar Sistemas de Producción Ciberfísicos (CPPS). Estos sistemas permiten la fusión de los mundos físico y virtual, mediante el uso de las tecnologías actuales tales como la IA, ML, big data, IoT y sistemas de red inalámbricos integrados [5]. El resultado es una fabricación inteligente, en la que los procesos están totalmente integrados y pueden responder en tiempo real a los cambios en los requisitos y condiciones de la fábrica, la cadena de suministro y las necesidades de los consumidores.

El rendimiento de estos sistemas inteligentes se evalúa utilizando los indicadores clave de rendimiento (KPIs) definidos en la norma ISO 22400 para sistemas de automatización e integración y en los estándares ANSI/ISA-95 para la integración de sistemas MES y ERP. El seguimiento y control de estos KPIs es crucial para mejorar la eficiencia y calidad de los procesos y productos y mantener la competitividad en el mercado [6] [3].

La calidad, como característica fundamental de productos y procesos, es una ventaja estratégica en la industria manufacturera. La Industria 4.0 y la idea de Calidad 4.0 buscan mejorar la calidad a través de soluciones y algoritmos inteligentes [7]. Aunque todavía es un área nueva de estudio, ya se están realizando investigaciones para entender cómo las industrias manufactureras inteligentes adoptan y aplican estándares para beneficiarse de la Industria 4.0.

En resumen, la Industria 4.0 representa una transformación profunda en los procesos de fabricación y producción, impulsada por los avances en las tecnologías disponibles. Este cambio no solo está afectando la forma en que se producen bienes y servicios, sino que también está reformulando la forma en que estos procesos se miden y evalúan, creando oportunidades y desafíos en la medición del rendimiento y la gestión de la calidad.

2.2. Internet de las Cosas (IoT)

Tal como se expuso en la sección anterior, la cuarta revolución industrial, conocida como Industria 4.0, incluye las fábricas inteligentes como un elemento clave para mejorar la eficiencia en todo tipo de empresas. La Industria 4.0 se caracteriza por la incorporación de tecnologías de punta en los procesos industriales para aumentar la productividad y flexibilidad, donde destacan el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA) y la robótica [8].

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), es un concepto que se refiere a la conexión digital interactiva de objetos cotidianos con la internet. Con la ayuda de la conectividad a internet y sensores, los objetos pueden recopilar y transmitir datos, interactuar con otros objetos o sistemas, y realizar tareas de manera autónoma. En el marco de la industria 4.0, IoT se convierte en una tecnología fundamental para la transformación digital de las fábricas, permitiendo la interconexión y comunicación en tiempo real entre las máquinas y equipos con un sistema de control central, lo que permite el monitoreo, análisis y toma de decisiones en tiempo real [9].

Un ejemplo de aplicación es el uso de sensores para monitorear la temperatura, humedad y los niveles de consumo eléctrico de la maquinaria existente en una instalación de producción, mientras que las máquinas conectadas proporcionan esta información en tiempo real, dejando entrever su estado y niveles de rendimiento. Los datos obtenidos pueden ser analizados mediante IA y algoritmos de aprendizaje automático para identificar patrones y optimizar los procesos de producción [9].

Esta conectividad aporta múltiples beneficios, como la optimización de los procesos productivos, la optimización de materia prima y la posibilidad de responder rápidamente a los cambios en la demanda del mercado. Sin embargo, la implementación del IoT en las fábricas también plantea ciertos desafíos que necesitan ser abordados, los cuales se ven en aumento si se considera la realidad de las pequeñas y medianas empresas.

Estos desafíos incluyen la necesidad de grandes inversiones en infraestructura y tecnología avanzada, la falta de personal altamente calificado con conocimiento en tecnologías digitales, y un mayor riesgo de ataques cibernéticos a medida que más dispositivos y sistemas están conectados a la internet. Para superar estas barreras, las empresas pueden considerar soluciones como la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 a pequeña escala para ganar experiencia y construir conocimientos antes de escalar a nivel de la empresa [8]. Además, la inversión en programas de capacitación para la fuerza laboral puede ayudar a las empresas a desarrollar las habilidades y experiencia necesarias para operar y mantener tecnologías de la Industria 4.0.

2.3. Indicador clave de desempeño (KPI)

En el dinámico y competitivo mundo empresarial de hoy, las empresas necesitan efectuar un seguimiento preciso de su rendimiento. Para hacerlo, la mayoría de las organizaciones contemporáneas recurren a sistemas de medición que les permiten dar una consideración precisa a los resultados y las responsabilidades asociadas, todo ello con el propósito de encaminar a la organización hacia el logro de sus objetivos [10]. En este sentido, para mantener el control y propiciar la mejora de los procesos, la medición e identificación de los Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) se vuelve una necesidad imperativa.

De acuerdo con la norma ISO 22400, un KPI se define como un nivel medible del logro de una meta crucial, derivado directamente o a través de una función de agregación de mediciones físicas, datos, o incluso otros KPIs [3]. De forma complementaria, el estándar VDMA 66412-1 los interpreta como indicadores empresariales que permiten evaluar los niveles de avance o rendimiento en relación con metas relevantes o factores críticos de éxito en el marco de una organización [11].

La norma AENOR UNE 66175, por su parte, ve un indicador como una serie de datos que contribuyen a medir objetivamente la evolución de un proceso o actividad [12]. En una línea similar, la norma AENOR UNE-EN 15341 expone que un indicador consiste en un conjunto de características de un fenómeno medido que, basándose en una fórmula específica, evalúa el rendimiento [13].

Teniendo en cuenta las anteriores definiciones, proponemos para este proyecto la siguiente: Un Indicador Clave de Desempeño es un nivel cuantificable del logro de un objetivo crítico, compuesto por elementos de medición que faciliten la identificación de problemas y el planteamiento de soluciones, con el objetivo de cumplir con las metas deseadas, añadir valor al proceso de manufactura implicado y promover la mejora continua de las organizaciones.

La Figura 2.2 busca visibilizar la función y finalidad de los KPIs, ilustrando su uso a través de la analogía con un lazo de control realimentado. En este modelo, el punto de partida es el establecimiento de un objetivo. Para su obtención, el administrador o propietario del KPI debe proponer las acciones necesarias para el proceso. Estas acciones generan un KPI que, al ser cotejado con el objetivo original, permite determinar el error y así decidir si se deben implementar o no

acciones de mejora para alcanzar los objetivos planteados.

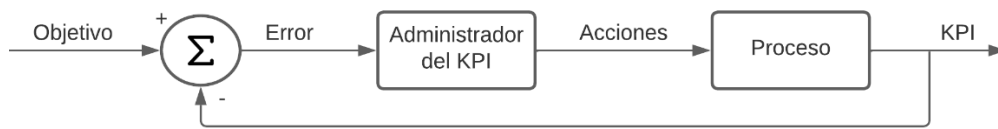


Figura 2.2: Analogía entre un lazo de control y la generación de un KPI.

2.4. ISO 22400

La norma ISO 22400 representa un estándar para la aplicación de los Indicadores Clave de Desempeño (KPIs), cuyas bases se encuentran en la norma IEC 62264. Para entender adecuadamente su enfoque y aplicación, es fundamental comprender los conceptos y modelos propuestos por IEC 62264. Esta última se enfoca en minimizar riesgos, costos y errores a través de la integración de las actividades empresariales y los sistemas de control de las empresas de manufactura. Los modelos propuestos por IEC 62264 incluyen:

2.4.1. Modelo de Jerarquía Funcional

Según IEC 62264-3, este modelo presenta una jerarquía funcional para las empresas de manufactura, relacionada con los sistemas de control y planificación, donde cada nivel ofrece funciones especializadas y tiene tiempos de respuesta característicos.

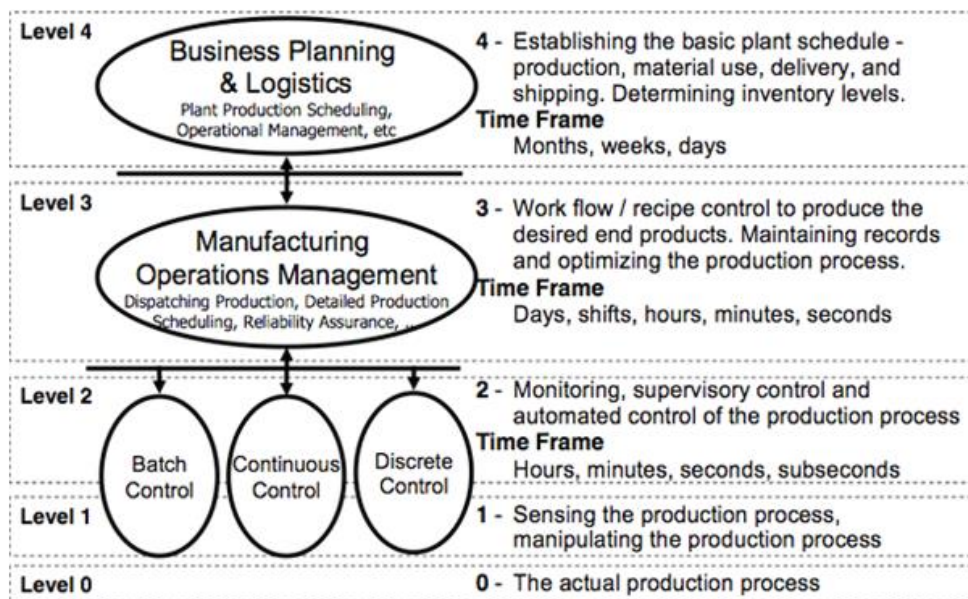


Figura 2.3: Diagrama jerarquía funcional adaptada de IEC 62264-3.

2.4.2. Modelo de Jerarquía de Equipos

Esta misma norma también define una estructura jerárquica para el equipo físico. Términos como empresa, sitio y áreas son genéricos, mientras que existen términos específicos para los centros y unidades de trabajo aplicables a la producción por lotes, continua, discreta o repetitiva, y al almacenamiento y traslado de materiales y equipos.

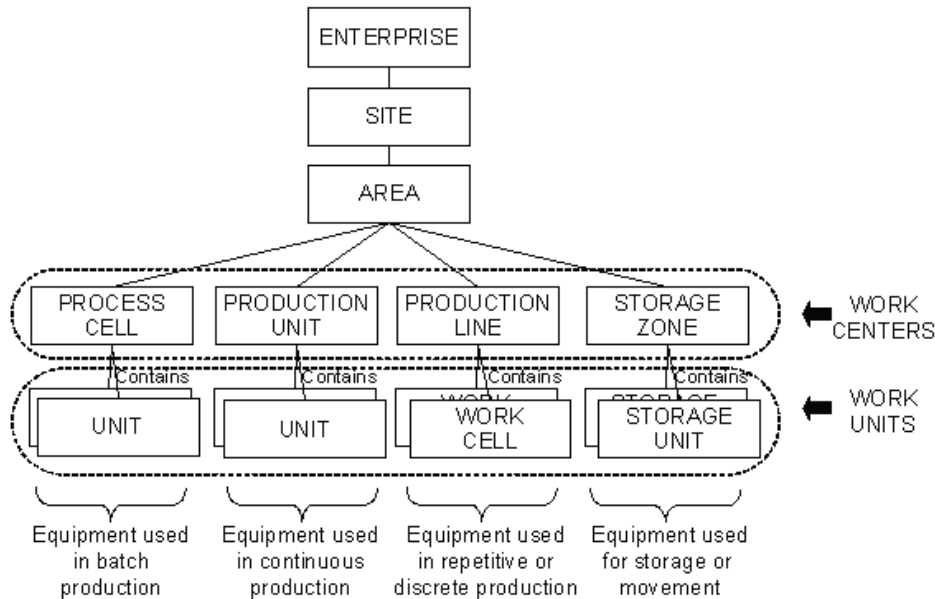


Figura 2.3: Diagrama jerarquía de equipos basada en roles, adaptada de IEC 62264-3.

2.4.3. Administración de Operaciones de Manufactura (MOM)

Las actividades MOM coordinan personal, equipo, materiales y energía para convertir materias primas y/o partes en productos mediante equipos físicos, esfuerzo humano y/o sistemas de información. MOM incluye la gestión de la información de los sistemas, uso, capacidad, definición, historia y estado de todos los recursos asociados con la fabricación (personal, materiales y equipos).

MOM se subdivide en cuatro categorías: administración de operaciones de producción, administración de operaciones de mantenimiento, administración de operaciones calidad y administración de las operaciones de inventario, siendo representadas en Figura 2.4 la como áreas sombreadas, junto a todas las unidades propias del modelo MES (Sistemas de ejecución de manufactura) y sus interacciones.

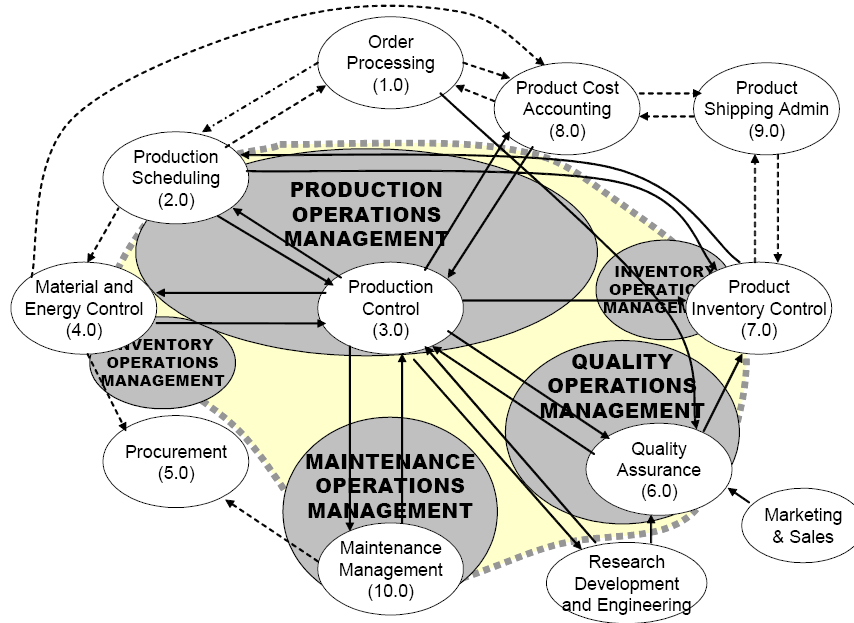


Figura 2.4: Modelo de administración de operaciones de manufactura.

Siguiendo el Modelo de Administración de Operaciones de Manufactura descrito en IEC 62264-3, se proponen cuatro modelos formales que conforman la base para que el estándar ISO 22400-2 proponga KPIs para MOM (Nivel 3).

- Modelo de administración de operaciones de producción.
- Modelo de administración de operaciones de mantenimiento.
- Modelo de administración de operaciones de calidad.
- Modelo de administración de operaciones de inventario.

Estos KPIs se calculan con datos obtenidos del dominio de control (Niveles 1 y 2) y buscan brindar información útil para la toma de decisiones al dominio de MOM (Nivel 3) y al dominio de la empresa (Nivel 4).

Tras identificar los modelos de la norma IEC 62264-3, la norma ISO 22400 define un marco neutral para la definición, composición, intercambio y uso de los KPIs, asociados con un nivel intermedio (Nivel 3) dentro de la jerarquía funcional (Figura 2.3), proponiendo 34 KPIs clasificados en las 4 categorías (Producción, Mantenimiento, Inventario y Calidad) tal como se observa en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: KPIs y su clasificación según ISO22400.

Nombre del KPI	Producción	Mantenimiento	Calidad	Inventario
Eficiencia del trabajador	X			
Ratio de asignación	X			
Índice de producción	X			
Eficiencia de asignación	X			
Eficiencia de utilización	X			
Índice de eficiencia general de los equipos	X			
Índice de eficiencia de equipos de red	X			
Disponibilidad	X			
Eficacia	X			
Índice de calidad			X	
Tasa de configuración	X			
Eficiencia técnica	X			
Ratio de proceso de producción	X			
Ratio de desecho planeado real			X	
Rendimiento de primer paso			X	
Ratio de desecho			X	
Ratio de re trabajo			X	
Ratio de disminución			X	
Índice de capacidad de máquina	X			
Índice de capacidad de máquina crítico	X			
Índice de capacidad de proceso	X			
Índice de capacidad de proceso crítico	X			
Consumo global de energía	X			
Turnos de inventario				X
Ratio de productos terminados	X			
Ratio de productos integrados	X			
Ratio de pérdida de producción	X			
Ratio de pérdida de almacenamiento y transporte				X
Ratio de otras pérdidas				X
Índice de carga de equipos	X			
Tiempo de operación medio entre fallas		X		
Tiempo medio de falla		X		
Tiempo medio de restauración		X		
Ratio de mantenimiento correctivo		X		

Cada KPI de los propuestos por el estándar ISO 22400 posee además una estructura de registro, donde se definen cada uno de sus atributos, como se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Estructura de la descripción de un KPI según ISO 22400.

DESCRIPCIÓN	
Nombre	Nombre del KPI
ID	Una identificación única definida por el usuario del KPI en el entorno del usuario
Descripción	Una breve descripción del KPI
Alcance	Identificación del elemento para el que es relevante el KPI, que puede ser una unidad de trabajo, centro de trabajo u orden de producción, producto o personal
Formula	La fórmula matemática del KPI especificado en términos de elementos
Unidad de medida	La unidad o dimensión básica en la que se expresa el KPI
Rango	Especifica los límites lógicos superior e inferior del KPI
Tendencia	Es la información sobre la dirección de mejora, más alto es mejor o más bajo es mejor
CONTEXTO	
Frecuencia de la medición	<p>Un KPI se puede calcular en</p> <ul style="list-style-type: none"> • En tiempo real: después de cada nuevo evento de adquisición de datos. • Bajo demanda: después de una solicitud de datos específicos. • Periódicamente: se realiza en un cierto intervalo.
Audiencia	<p>La audiencia es el grupo de usuarios que normalmente usa este KPI:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Operadores: personal responsable de la operación directa del equipo • Supervisores: personal responsable de dirigir las actividades de los operadores • Administrador: personal responsable de la ejecución general de la producción.
Metodología de producción	<p>Especifica la metodología de producción para la que generalmente se aplica el KPI:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Discreto • Batch • Continuo
Modelo de efecto	El diagrama del modelo de efecto es una representación gráfica de las dependencias de los elementos del KPI que se puede utilizar para profundizar y comprender el origen de los valores.
Notas	<p>Puede contener información adicional relacionada con el KPI:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Restricciones, usos • Otra información

3. Caracterización del sector industrial regional

La industria manufacturera en la Región del Biobío ha sido una fuente significativa de ingresos y empleo, contribuyendo con el 18,4% del PIB regional (2022) [14] y proporcionando aproximadamente el 13,8% del empleo (actualizado al segundo trimestre 2023) [15]. Sin embargo, ha estado experimentando un estancamiento con el pasar de los años y una posterior disminución en el último año, lo cual es especialmente preocupante para la región. Factores externos como la pandemia podrían ser un causante de este comportamiento, pero un factor clave de esta disminución es la dependencia de las importaciones de tecnologías y productos manufacturados debido a la falta de una industria local competitiva. La tecnologización limitada y la falta de control sobre los procesos productivos son también desafíos notables que enfrentan las pequeñas y medianas empresas (Pymes) manufactureras en la región. A pesar de estar en un país con una rica actividad académica y de investigación y desarrollo, sólo el 24% de las empresas han colaborado con centros de conocimiento en los últimos 5 años [16].

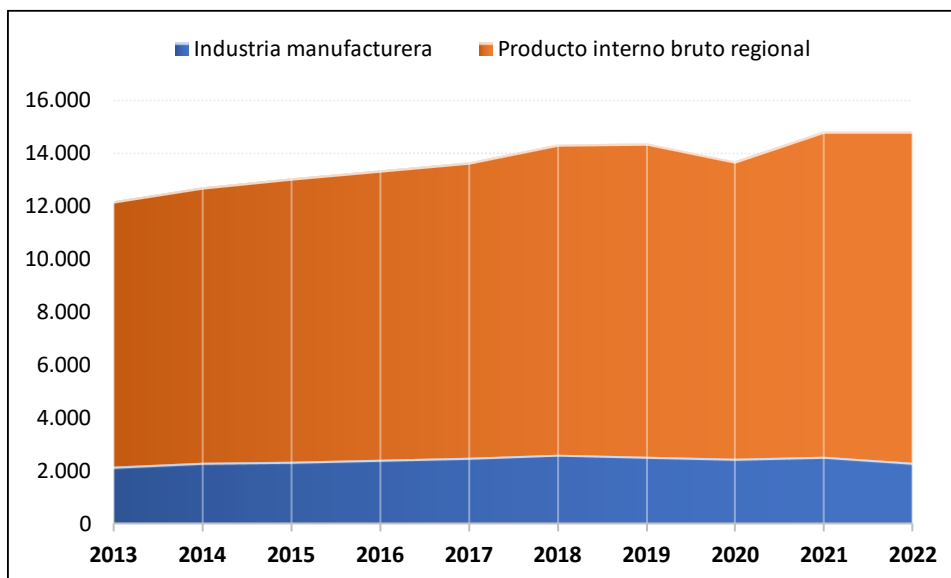


Figura 3.1: Aporte del sector manufacturero al PIB regional (miles de millones de pesos).

La Región del Biobío, a pesar de su importancia, enfrenta varias limitaciones, entre las que destaca la baja productividad de sus empresas. En particular, las Pymes, que constituyen un foco de debate en la Estrategia de Desarrollo Regional de la región [17], suelen carecer de competitividad, sufrir una rotación constante y tener bajos niveles de productividad. Además, la apertura comercial

a través de tratados de libre comercio ha afectado a las Pymes, que anteriormente abastecían los mercados internos, llevando a muchas de ellas a desaparecer.

Ante este escenario, existe una necesidad crítica de impulsar las Pymes manufactureras a un estado superior de desarrollo. Este avance implica la adopción de la Manufactura Avanzada, que se basa en la incorporación de información del proceso, automatización, hardware y software, uso de materiales emergentes y capacidades de fabricación avanzada, mediante herramientas propias de la industria 4.0 mencionadas en capítulos anteriores, tal de transformar la industria manufacturera tradicional a una industria de manufactura avanzada.

3.1. Rubros y capacidad de manufactura

Al examinar cuidadosamente la estructura del sector manufacturero regional, es posible destacar tres áreas predominantes en la industria: la maderera, la metalmecánica y la de manufactura general no metálica. De las cuales, el rubro metalmecánico destaca con una evidente predominancia de un universo de 210 empresas encuestadas a lo largo del desarrollo del proyecto “Fortalece Pyme Biobío” dirigido por el Centro para la Industria 4.0 de la Universidad de Concepción [18].

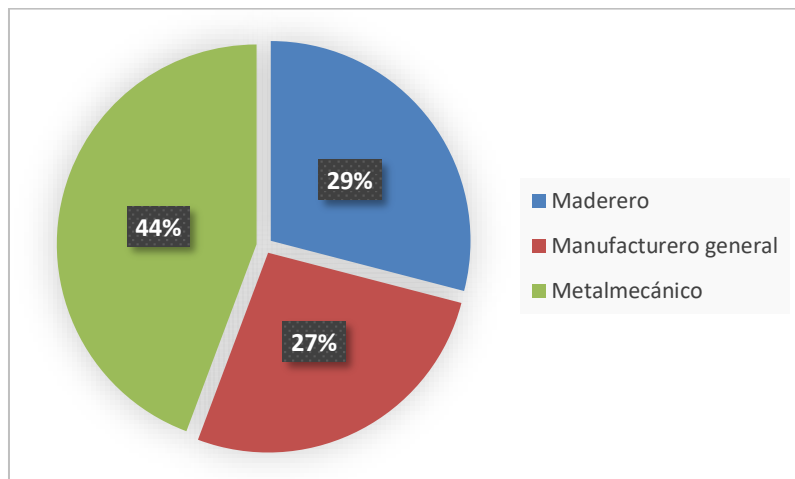


Figura 3.2: Distribución por rubro de la industria manufacturera regional.

Otra diferencia que se hace evidente de inmediato es la complejidad de sus productos finales, lo que, a su vez, refleja el grado de tecnología que han integrado en sus empresas para llevar a cabo las actividades propias de sus procesos productivos con tal de garantizar eficiencia y calidad [16].

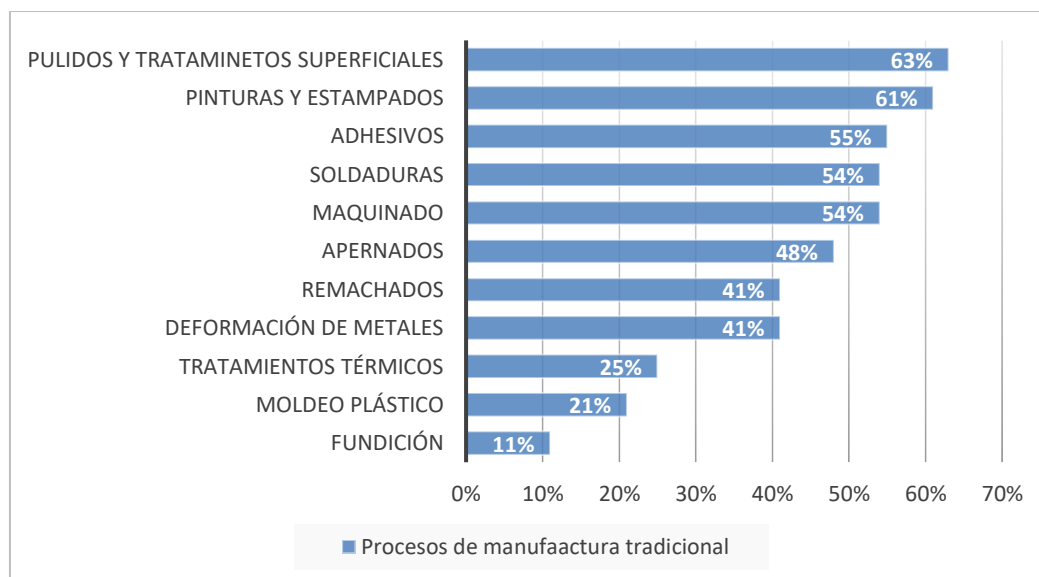


Figura 3.3: Actividades presentes en los procesos de manufactura regional.

Bajo este contexto, el sector metalmecánico nuevamente vuelve a ser relevante, dado que la mayor parte de actividades realizadas por la industria requiere de maquinaria especializada propia de este rubro. Si bien la mayor parte del sector sigue trabajando con técnicas manuales y de poca sofisticación, la demanda de los mercados por tiempos de respuesta más acotados y niveles de calidad superiores, han impulsado el interés del rubro a través de los años por adquirir herramientas que los ayuden a responder esta necesidad. De lo anterior, destaca el aumento en la presencia de herramientas CNC, tales como mesas de corte, centro de mecanizado y tornos [16].

Tabla 3.1: Presencia de herramientas por rubro.

Herramienta \ Rubro	Soldadura CNC	Apernado CNC	Mesa de corte	Centro mecanizado	Torno	Fresa	Impresión 3D	Pulido y tratamiento sup. CNC	Pinturas y estampados CNC
Metalmecánica	8%	0%	42%	13%	21%	8%	4%	21%	17%
Manufactura general no metálica	6%	6%	19%	13%	6%	6%	25%	13%	13%
Maderero	0%	0%	8%	25%	8%	17%	0%	8%	8%

Sin embargo, los antecedentes muestran que la falta de estrategias y metodologías eficientes de trabajo a nivel de MOM y como estas interactúan con los niveles superiores, se traduce en casi la totalidad de los casos en un desaprovechamiento tanto de recursos materiales, energéticos y humanos, factor que se vuelve más relevante aun cuando el 82% de los trabajos realizados corresponden a producciones bajo demanda y de carácter personalizado [16].

A estas alturas, la necesidad de incorporar tecnología en estos procesos de producción se vuelve altamente necesario con tal de establecer indicadores de producción, promoviendo una estructura de manufactura ordenada, flexible y eficaz. Sin embargo, para encarar este reto, es importante tener en cuenta la realidad actual de la industria Pyme, la cual ya tiene una infraestructura y maquinaria con escasa o ninguna capacidad de integración con sistemas inteligentes. Además, debido a la considerable inversión que requeriría una renovación tecnológica, este camino resulta completamente impracticable.

La región del Biobío posee una serie de condiciones favorables para abordar estos problemas, como la existencia de instituciones dedicadas a la ciencia y la tecnología, fuentes de financiamiento para la innovación tecnológica, universidades prestigiosas, asociaciones empresariales, y grandes industrias tractoras que fomentan la creación de más Pymes. Por lo tanto, existe una oportunidad para que las Pymes adopten y adapten las mejores tecnologías disponibles para transformarse de una industria manufacturera tradicional a una industria de manufactura avanzada basada en tecnologías propias de la industria 4.0.

Esto último es uno de los objetivos del proyecto FIC “*Manufactura Avanzada: Mayor productividad en pymes*”, que actualmente se encuentra en ejecución y tal como se ha mencionado en capítulos anteriores, ha servido de contexto para la redacción de esta memoria de título, desde el levantamiento de información sectorial hasta el desarrollo de un sistema que logre dar solución a estas problemáticas. Para ello, es necesario comenzar por la identificación de los indicadores clave de desempeño que se ajusten a lo requerido por la industria regional, en base a su infraestructura y estrategias de producción, tema que será abordado en el siguiente capítulo.

4. Selección y estrategia de implementación de KPIs

En vista de la información recogida a través de las herramientas de diagnóstico que se aplicaron a un total de 210 empresas pymes manufactureras en la región, cuyos desgloses y hallazgos más pertinentes para este estudio se presentaron en el capítulo anterior, podemos identificar ciertas tendencias que nos ayudarán a concentrar los esfuerzos en una solución que responda a la problemática de la manera más general posible.

Con esto en mente, y usando de referencia lo establecido por la normativa ISO 22400, se proponen los siguientes pasos para la aplicación de KPIs:

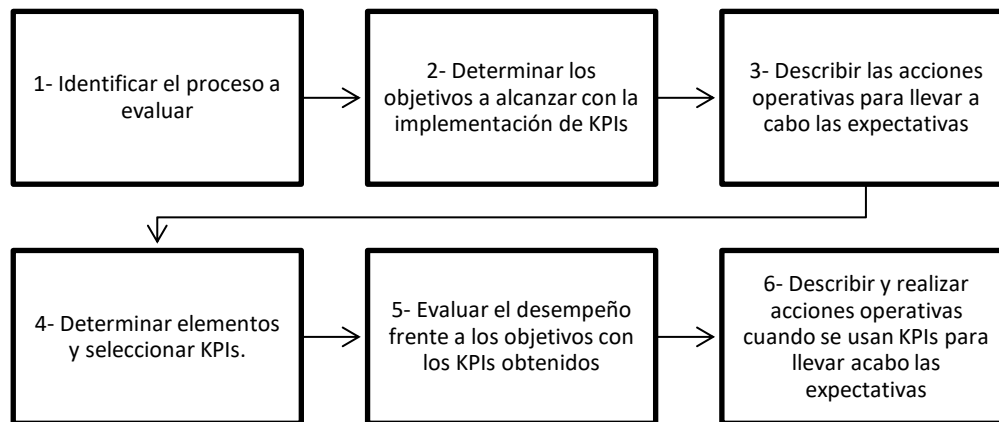


Figura 4.1: Pasos del método para la aplicación de KPIs basado en ISO22400.

4.1. Paso 1: Identificar el proceso a evaluar

Según lo sugerido por la normativa ISO 22400, el primer paso en la implementación de KPI en la industria manufacturera es identificar el proceso a evaluar. Este es un paso crucial, ya que implica definir y entender en profundidad los factores y actividades críticas que determinan el estado actual de la operación.

Para ello es fundamental identificar tanto los procesos como los subprocesos, además de las condiciones necesarias para su ejecución. El propósito de esta identificación es establecer medidas y acciones operativas que permitan ajustar los procesos y alcanzar las metas planteadas.

Esto se logra identificando las actividades críticas (aquellas que tienen un impacto

significativo en los objetivos estratégicos de la empresa) que se deben medir y controlar, basándose en las problemáticas existentes y las necesidades del proceso.

Para el caso de las Pymes manufactureras regionales, se ha podido evidenciar una clara oportunidad de mejora en el uso eficiente de la maquinaria existente en sus instalaciones, más aún cuando la información levantada indica una sobrecarga de tareas en estas unidades de trabajo, dada la poca diversificación en sus líneas de producción, la poca cantidad de máquinas instaladas en planta y la variada complejidad de los productos que manufacturan, los cuales en muchas ocasiones requieren pasar por más de una de estas unidades de trabajo hasta lograr ser un producto terminado. Esto genera colas de trabajo significativamente largas, lo que sumado a una pobre comunicación entre las áreas de ejecución de manufactura y el área administrativa de las empresas, terminan por generar una grave desorganización en los tiempos de trabajo y recursos utilizados.

Por todo lo anterior y en contexto de la realidad industrial Pyme, se propone a modo general establecer como actividad crítica de las empresas manufactureras, cualquier proceso de fabricación que requiera maquinaria especializada y de cuya operatividad dependan otras líneas productivas o servicios propios de la empresa.

4.2. Paso 2: Determinar objetivos

Una vez identificada la actividad crítica, es imprescindible establecer los objetivos que guiarán la interpretación de los indicadores y las acciones a tomar. Estos objetivos, funcionan como una referencia de llegada y describen las características del resultado que se espera. Además, deben ser claros, precisos y cuantificados para definir con precisión las estrategias a emplear. [19]

Definir de manera correcta los objetivos permite una acción coordinada, y facilita los ajustes necesarios para alcanzarlos, mejorando el rendimiento global. Análogamente, los objetivos específicos deben ser medibles, alcanzables, coordinados, desafiantes y comprometedores, para involucrar al personal y permitir flexibilidad mediante planes de acción [12]. Esto es coherente con la estructura planteada por estándar ISO 22400 que fue expuesta anteriormente en la Tabla 2.2, que establece objetivos cuantificables en base a valores deseados, periodos de tiempo para alcanzarlos y un valor de referencia aceptable del KPI.

Para establecer los objetivos, resulta necesario la interacción con las partes interesadas. La experiencia alcanzada con variadas Pymes manufactureras regionales y sus realidades, proporcionaron referencias que han ayudado a la generación de pautas que orientan el trabajo sobre estos objetivos. Con base en lo anterior, las directrices para tener en cuenta son:

- Establecer los objetivos generales enfocados en el área de producción, basándose en la estrategia administrativa de la empresa y teniendo en cuenta como estos tendrían impacto en su posicionamiento con respecto a sus pares en el sector industrial.
- Establecer objetivos específicos para cada objetivo general. Estos objetivos deben ser medibles, y además deben considerar las problemáticas y necesidades identificadas en la actividad crítica (Paso 1), así como las aspiraciones de mejora que se desean alcanzar.

En base a las necesidades identificadas y a cómo debe componerse un objetivo específico, se propone la siguiente tabla para registrar estos objetivos, usando como referencia lo requerido por el estándar ISO 22400.

Tabla 4.1: Tabla propuesta para registro de objetivos específicos.

COMPONENTES DEL OBJETIVO	DESCRIPCIÓN
Actividad o proceso	Proceso o actividad por evaluar
Acción	Descripción del objetivo
Valor de referencia del KPI	Rango aceptable de desempeño del KPI y tendencia deseada
Valor Objetivo	Valor numérico por alcanzar
Unidad del valor objetivo	Unidad de medida
Tiempo límite	Tiempo establecido para alcanzar el objetivo

4.3. Paso 3: Describir las acciones operativas

El tercer paso en la implementación de KPIs según la normativa ISO 22400 es la descripción de las acciones operativas para alcanzar las expectativas establecidas. Dicho de otra manera, las acciones operativas delimitan el camino para alcanzar los objetivos, señalando cómo se deben realizar las actividades y utilizar los recursos de una empresa con el fin de obtener los mejores resultados [20].

Por lo tanto, en este paso se sugiere organizar una reunión con las partes interesadas para determinar, en función del objetivo, las necesidades del proceso y su flexibilidad, cuáles serán las acciones operativas que permitan alcanzar las metas propuestas. El estándar ISO 22400 utilizado como referencia, propone algunas de estas acciones operativas [2]:

- Revisión de los procedimientos y programas.
- Mejora, calibración o reemplazo de los recursos de manufactura.
- Modificación de la configuración del funcionamiento de los sistemas y aplicaciones.
- Rediseño de sistemas y aplicación de nuevas arquitecturas.
- Control de los KPIs.

Es importante señalar que las acciones operativas descritas son solo recomendaciones propuestas por la ISO 22400. En muchos de los casos, las Pymes manufactureras regionales carecerán de la posibilidad de tomar acción sobre varias de estas propuestas, ya sea porque no tienen implementados los sistemas de control necesarios o porque derechamente nunca han establecido formalmente alguna estructura o procedimiento. Siendo esta una premisa para la correcta implementación de KPIs, en el siguiente capítulo se propone una solución tecnológica que vendría a dar solución a parte de esta problemática, ofreciendo métodos de monitoreo y control para una eventual toma de acciones y aplicación de estas estrategias.

4.4. Paso 4: Determinar elementos y seleccionar KPIs

Una vez definidas las acciones operativas, es crucial establecer los Indicadores Clave de Rendimiento que se aplicarán al proceso productivo. Para ello, existen dos formas de abordar este desafío: la primera sería seguir el desarrollo lógico expuesto a lo largo de estos pasos, donde los elementos críticos se derivan del objetivo y en función de estos se busca o se crea el KPI adecuado. La segunda opción, es elegir directamente el KPI más apropiado de entre los existentes (Tabla 2.1) y luego se identifican los elementos críticos dentro del proceso. Esto último es muy poco recomendado dado que una elección arbitraria puede quedar fuera del foco de interés de las empresas. Es esencial tener en cuenta que solo se deben seleccionar o crear los KPIs que sean "rentables", es decir, aquellos cuya relevancia justifique el esfuerzo necesario para obtenerlos.

Para lo anterior se propone el siguiente procedimiento:

- Identificar posibles elementos críticos relacionados con los objetivos que permitan evaluar el objetivo mediante la comparación de mediciones.
- Confirmar la existencia de estos elementos en el proceso, asegurándose de que sean cuantitativos y relevantes.
- Detallar las actividades, datos e información que influyen en cada elemento.
- Establecer KPIs con los elementos obtenidos. Se sugiere buscar y seleccionar de la Tabla 2.1 los KPIs que estén relacionados con los elementos identificados.

Si bien todo el proceso de definición de objetivos depende mucho de la realidad y visión de cada Pyme, la elección de los KPIs podría llegar a convertirse en una tarea muy personalizada. Sin embargo, a través de una constante interacción con la Pyme manufacturera regional, se han identificado claras tendencias e intereses que se podrían resumir en el siguiente esquema de objetivos generales transversales:

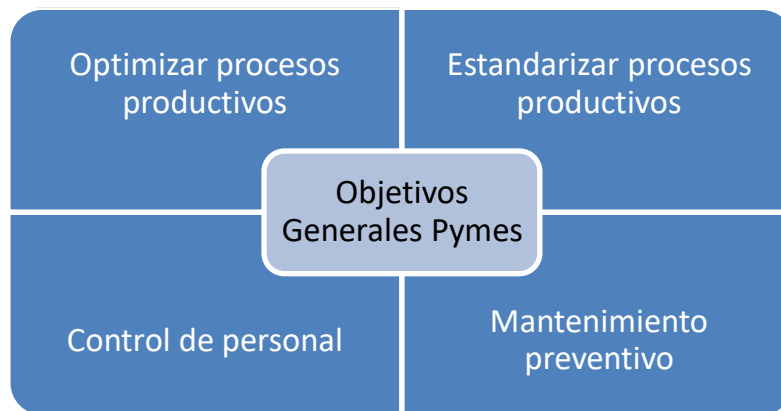


Figura 4.2: Objetivos generales más transversales en la Pyme manufacturera.

Teniendo en mente estos objetivos y el desarrollo planteado a lo largo de los pasos anteriores, en donde se considera como actividad crítica de las Pymes aquellos procesos que requieran de maquinaria especializada para tareas de fabricación, podemos realizar un acercamiento a la unidad de trabajo e identificar como elemento crítico a la maquina y su operador. Es así, como en base de sus actividades, la forma de funcionamiento y responsabilidades asociadas, podemos proponer un set de KPIs estandarizados según la norma ISO 22400 (Tabla 2.1) que atiendan este requerimiento generalizado por la industria Pyme manufacturera.

Tabla 4.2: KPI Eficiencia del trabajador.

Nombre del KPI	Eficiencia del trabajador
Descripción	La eficiencia del trabajador considera la relación entre el tiempo de trabajo real del personal (APWT) relacionado con las órdenes de producción y el tiempo de asistencia total del personal (APAT) en su jornada laboral
Formula	$\text{Eficiencia del trabajador} = APWT/APAT$
Unidad de medida	%
Rango	Min: 0% Max: 100%
Tendencia	Cuanto más alto, mejor

Tabla 4.3: KPI Índice de producción.

Nombre del KPI	Índice de producción
Descripción	Rendimiento del proceso en términos de la cantidad producida de una orden (PQ) y el tiempo de ejecución real de una orden (AOET).
Formula	$\text{Índice de producción} = PQ/AOET$
Unidad de medida	Cantidad de unidades / Unidad de tiempo
Rango	Min: 0 unidades de cantidad / unidad de tiempo Max: Específico del producto.
Tendencia	Cuanto más alto, mejor

Tabla 4.4: KPI Eficiencia de asignación.

Nombre del KPI	Eficiencia de asignación
Descripción	La eficiencia de asignación es la proporción entre el tiempo real de asignación de una unidad de trabajo expresado como el tiempo real de ocupación de la unidad (AUBT) y el tiempo planificado para asignar la unidad de trabajo expresado como el tiempo planificado de ocupación de la unidad (PBT).
Formula	$\text{Eficiencia de asignación} = AUBT/PBT$
Unidad de medida	%
Rango	Min: 0% Max: 100%
Tendencia	Cuanto más alto, mejor

Tabla 4.5: KPI Eficiencia de utilización.

Nombre del KPI	Eficiencia de utilización
Descripción	La eficiencia de utilización es la proporción entre el tiempo real de producción (APT) y el tiempo real de ocupación de la unidad (AUBT).
Formula	$\text{Eficiencia de utilización} = \text{APT} / \text{AUBT}$
Unidad de medida	%
Rango	Min: 0% Max: 100%
Tendencia	Cuanto más alto, mejor

Tabla 4.6: KPI Índice de eficiencia general de los equipos.

Nombre del KPI	Índice de eficiencia general de los equipos
Descripción	El índice OEE representa la disponibilidad de una unidad de trabajo, la eficacia de la unidad de trabajo y el índice de calidad. Estos tres KPI integrados en un solo indicador.
Formula	$\text{Índice OEE} = \text{Disponibilidad} * \text{Eficacia} * \text{Calidad}$
Unidad de medida	%
Rango	Min: 0% Max: 100%
Tendencia	Cuanto más alto, mejor

Tabla 4.7: KPI Disponibilidad.

Nombre del KPI	Disponibilidad
Descripción	La disponibilidad es una proporción que muestra la relación entre el tiempo real de producción (APT) y el tiempo planificado de ocupación (PBT) para una unidad de trabajo.
Formula	$\text{Disponibilidad} = \text{APT} / \text{PBT}$
Unidad de medida	%
Rango	Min: 0% Max: 100%
Tendencia	Cuanto más alto, mejor

Tabla 4.8: KPI Índice de Calidad.

Nombre del KPI	Índice de Calidad
Descripción	El índice de calidad es la relación entre la cantidad de productos buenos (GQ) y la cantidad producida (PQ).
Formula	$\text{Índice de Calidad} = GQ/PQ$
Unidad de medida	%
Rango	Min: 0% Max: 100%
Tendencia	Cuanto más alto, mejor

Tabla 4.9: KPI Eficacia.

Nombre del KPI	Eficacia
Descripción	La eficacia representa la relación entre el ciclo objetivo planificado y el ciclo real, expresado como el tiempo de ejecución planificado por artículo (PRI) multiplicado por la cantidad producida (PQ) dividido por el tiempo real de producción (APT).
Formula	$\text{Eficacia} = PRI * PQ/PBT$
Unidad de medida	%
Rango	Min: 0% Max: 100%
Tendencia	Cuanto más alto, mejor

Tabla 4.10: KPI Consumo total de energía.

Nombre del KPI	Consumo total de energía
Descripción	El consumo total de energía es la proporción entre toda la energía consumida en un ciclo de producción y la cantidad producida (PQ).
Formula	$e = E/PQ$ Donde: e: consumo unitario de energía de un equipo E: consumo energético integral
Unidad de medida	kWh / número de unidades
Rango	Min: 0 kWh / número de unidades Max: Especifico del producto
Tendencia	Cuanto más bajo, mejor

Tabla 4.11: KPI Tiempo promedio de falla.

Nombre del KPI	Tiempo promedio de falla
Descripción	El tiempo promedio de falla se calcula como el promedio de todas las medidas de tiempo hasta el fallo (TTF) (sin contar el tiempo de reparación) para una unidad de trabajo en todas las instancias de fallo (FE).
Formula	$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^{i=FE} TTF_i}{FE + 1}$
Unidad de medida	Horas
Rango	Min: 0 Max: Infinito
Tendencia	Cuanto más alto, mejor

4.5. Paso 5: Evaluar desempeño

Una vez establecidos los KPIs y sus respectivos elementos, se recopilan y analizan los datos para evaluar el rendimiento en relación con los objetivos establecidos. Como ya se mencionó anteriormente, los KPIs están diseñados para calcularse usando medidas o datos de nivel operativo (nivel 2) para proporcionar información útil para la toma de decisiones a nivel empresarial (nivel 4) y de gestión de operaciones de manufactura MOM (nivel 3).

La recopilación de estas medidas implica el uso de diferentes herramientas de medición (documentación, contadores, sensores, sistemas de gestión de mantenimiento informático, etc.) que variarán en función del grado de automatización de la empresa. En el caso de las Pymes, casi su totalidad mantiene las actividades de ejecución manufacturera con registros en papel, detallando de manera precaria y sin mayores detalles que permitan evaluar estadísticamente niveles de desempeño. Como se mencionó anteriormente, una solución a esta problemática será planteada en el capítulo siguiente.

Una vez obtenidas las medidas, se procede al cálculo del KPI y se examina la discrepancia entre los resultados deseados y reales, así como el progreso del proceso en función de sus objetivos. Este análisis facilita la toma de decisiones e identifica áreas que requieren mejoras.

En base al valor obtenido del KPI, se pueden dar dos escenarios:

- El valor del KPI está dentro del rango aceptable, esto indica que el rendimiento de la actividad o proceso está en línea con las expectativas o planificaciones.
- El valor del KPI se encuentra fuera del rango aceptable, esto significa que el rendimiento obtenido no alcanza las expectativas o lo deseado. En este caso, se deben implementar acciones correctivas para mejorar el rendimiento y alcanzar la meta establecida.

4.6. Paso 6: Realización de acciones en favor de las expectativas

Como último paso, una vez que se ha realizado la evaluación, es esencial establecer propuestas de mejora que permitan efectuar modificaciones en el proceso.

De esta manera los indicadores deben revisarse en conjunto con los objetivos y estrategias para que el proceso se vuelva cada vez más preciso, rápido, oportuno, confiable y sencillo. Para lograr esto, es necesario implementar cambios por medio de acciones asociadas que permitan eliminar defectos y sus causas, lograr un nuevo estado de rendimiento del proceso y mantener o mejorar la eficiencia y efectividad del proceso.

Una vez que las acciones asociadas han sido definidas y aprobadas, es crucial que la persona encargada las implemente, con el fin de llevar el proceso al objetivo planteado.

En resumen, se propone el siguiente procedimiento:

- Identificar las causas que impiden alcanzar el objetivo, realizando un análisis de las actividades que influyen en los elementos críticos.
- Clasificar las causas de acuerdo con las acciones operativas.
- Determinar y ejecutar las acciones necesarias.

Este procedimiento sistemático, fácil y rápido permite determinar y ejecutar acciones con sustento en los datos, cubriendo una mayor cantidad de problemas, causas y soluciones que no serían evidentes mediante la simple observación del proceso.

5. Solución propuesta para adquisición de datos

Como ya se ha mencionado en variadas oportunidades, los niveles de tecnologización de los procesos manufactureros en las Pymes de la región se encuentran muy alejados de lo que entidades internacionales han fijado como estándar. Un claro ejemplo de esto es lo observado en el capítulo anterior, donde al momento de ser necesario un método eficiente para la recolección de datos provenientes de los elementos críticos dentro del proceso productivo (maquina y operador para este caso), la Pyme aún se maneja con documentos en papel con escueta información para la administración en nivel MOM, la cual no cumple con lo mínimo para poder levantar indicadores.

Esto no sería un problema si la maquinaria instalada en las empresas incorporara la tecnología necesaria para adquirir varios de estos indicadores de manera autónoma, pero la realidad encontrada en el sector industrial es que la maquinaria en su gran mayoría es antigua, de operación mayormente manual y sin ningún tipo de sistema de sensores o interfaz que permita adquirir datos para luego ser evaluados.

Considerando lo anterior, en este capítulo se propondrá la implementación de un sistema tecnológico que haga sentido al escenario actual de trabajo de las Pymes manufactureras. Que permita el levantamiento de información directamente en la unidad de trabajo, con una instalación que requiera de poca intervención y capacidad de trabajar en maquinaria “Legacy”.

5.1. Sistema de monitoreo de consumo eléctrico para levantamiento de KPIs

Con base a todos los puntos identificados a lo largo de este informe, se propone la implementación de un sistema de monitoreo de consumo eléctrico basado en IoT que requiera de la menor intervención posible en la máquina, obteniendo datos directamente de sus tareas productivas y que esté acompañado a una interfaz de usuario que permita al operador seleccionar ordenes de trabajo a producir. Los datos una vez adquiridos, procesados e interpretados, serán desplegados en un dashboard en forma de KPs, siguiendo los lineamientos establecidos por estándares como la ISO 20400, aportando a la gestión operativa de la manufactura un nuevo nivel de eficiencia en la administración de recursos, y de paso, acotar brechas tecnológicas e incentivar el acercamiento a las tecnologías propias de la industria 4.0.

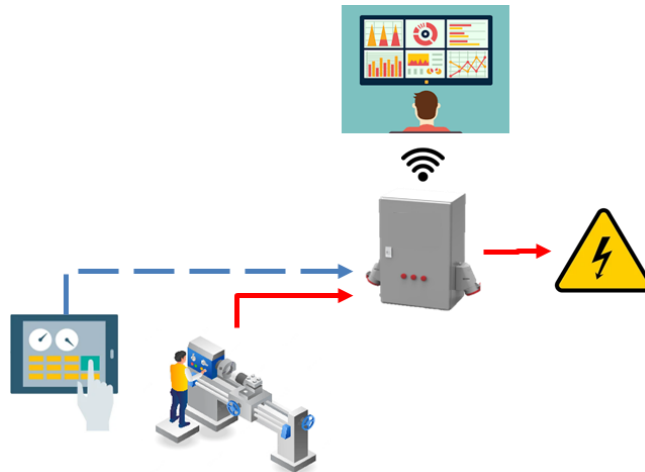


Figura 5.1: Esquema representativo de la solución propuesta.

5.1.1. Primeros diseños de concepto

El concepto inicial buscaba que el dispositivo fuera robusto, tal que pudiese estar sometido a condiciones de trabajo con alta exposición a golpes y proyección de materiales. Además, en la búsqueda de que la instalación fuera lo más sencilla posible y comprometiera lo menos posible el estado inicial de la máquina, se consideran conectores de entrada y salida trifásicos, quedando el dispositivo entre la toma de alimentación de la maquinaria y el punto de energización instalado en la planta. Cada una de las líneas trifásicas estarían conectadas internamente a módulos de medición de voltaje y corriente que se encargarían de sensar las variables, procesarlas y transmitir la información mediante protocolo UART a una Raspberry pi 3 encargada de almacenar la información y desplegarla localmente a través de una pantalla. Estos datos también podrían ser consultados por medio de una red local desde las oficinas de administración.



Figura 5.2: Concepto de diseño a desarrollar como prototipo.

5.1.2. Fabricación de prototipo

Una vez definidos los requerimientos y condiciones de operación, se diseña y fabrica la electrónica de los módulos de medición, implementando su conjunto en un gabinete eléctrico.

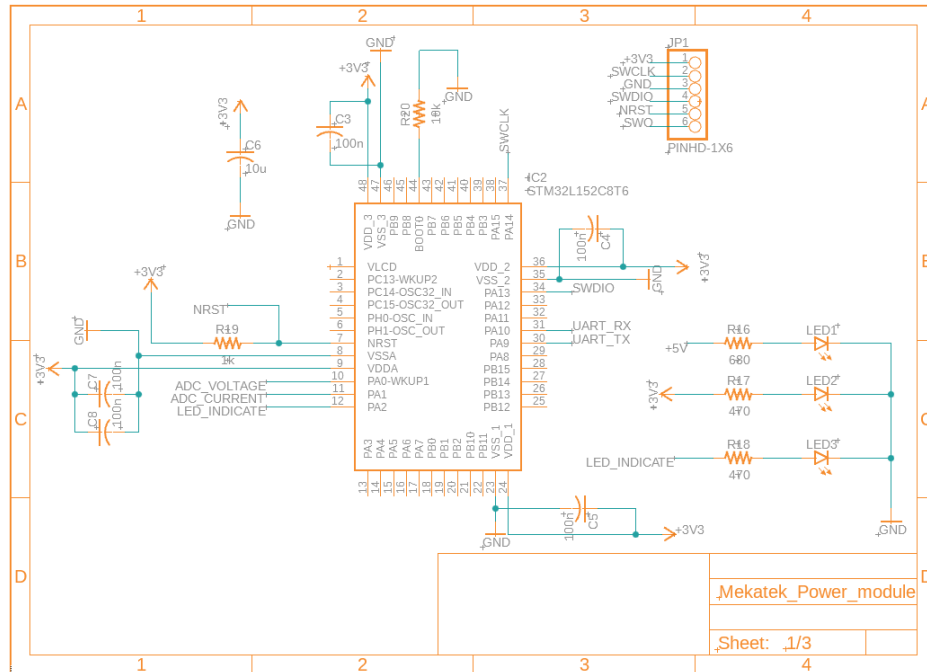


Figura 5.3: Esquemáticos módulo de medición (1/3).

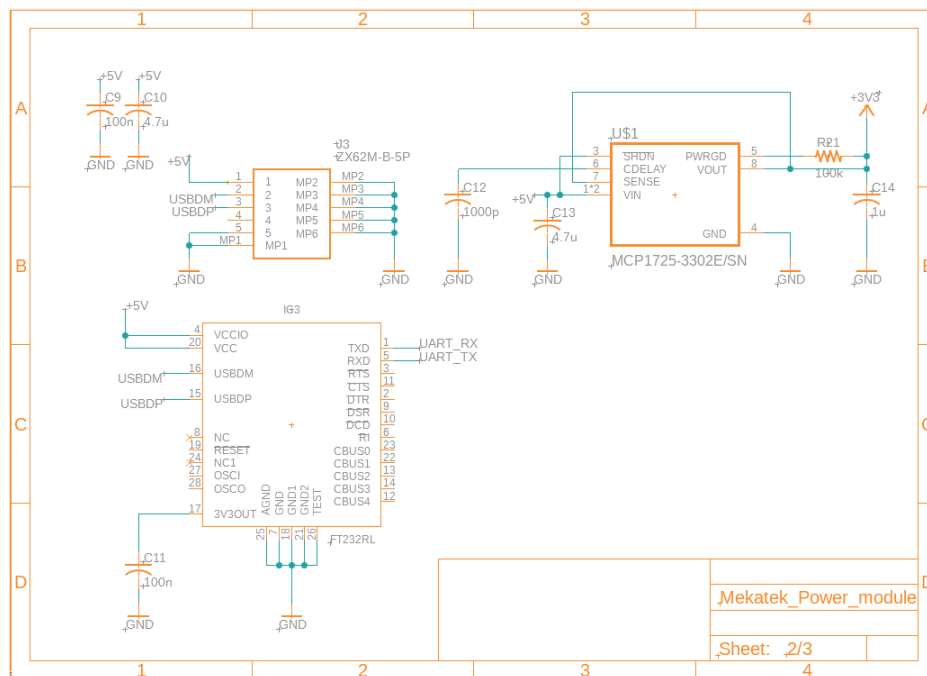


Figura 5.4: Esquemáticos módulo de medición (2/3).

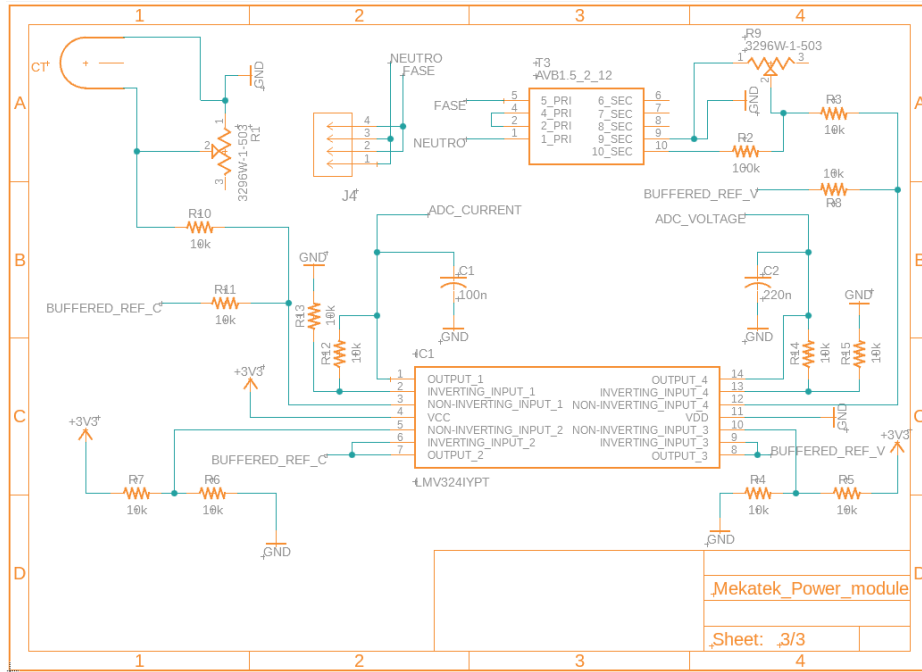


Figura 5.5: Esquemáticos módulo de medición (3/3).

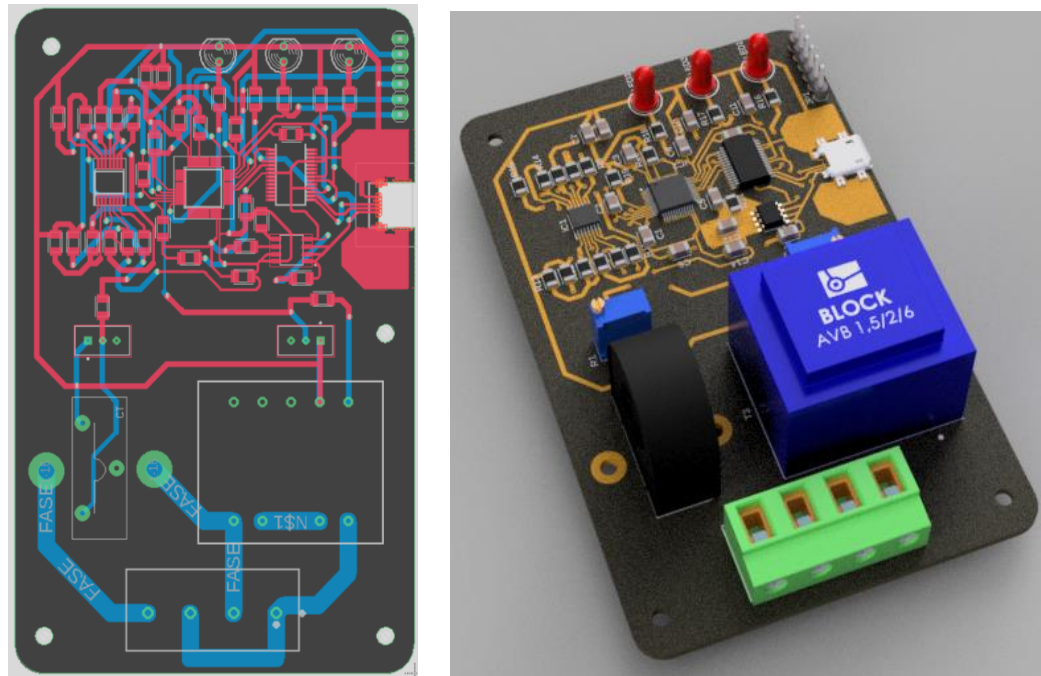


Figura 5.6: Diseño electrónico y renderizado del módulo de medición.



Figura 5.7: Fabricación de PCB y ensamble del sistema prototipo.

Finalmente las variables monitoreadas y desplegadas en pantalla son:

Tabla 5.1: Variables eléctricas desplegadas en pantalla local.

Voltaje	V_a, V_b, V_c
Corriente	I_a, I_b, I_c
Potencia activa	P_a, P_b, P_c
Potencia reactiva	Q_a, Q_b, Q_c
Factor de potencia	FP

5.1.3. Implementación del prototipo en la industria

Como se expuso en el capítulo 3, el sector metalmecánico tiene la mayor presencia en la región, donde de una total de 93 empresas pymes registradas, 58 de ellas son maestranzas con maquinaria especializada y cuyos productos terminados, que pueden ser de diversa complejidad, requieren el paso por una o más de estas máquinas.

- Si bien poseen la maquinaria necesaria que les permite realizar sus tareas, estas suelen ser antiguas y si ningún tipo de interfaz para rescatar datos de funcionamiento, más que lo que el operador puede percibir trabajando como una unidad independiente.
- Administrativamente suele haber una desconexión total entre los niveles de gestión 3 y 4, lo que se traduce en cuellos de botella por la mala gestión de los recursos y ordenes de trabajo.

- La mayoría de los trabajos realizados por este sector son personalizados y masivos, pero la poca flexibilidad de sus líneas productivas así como el desconocimiento de los recursos necesarios (tiempo, energía, materiales, etc.) para llevar a cabo dichas tareas, resulta en una incorrecta estimación de sus costos operacionales.

Estas problemáticas que se repiten constantemente en el sector metalmecánico lo convierten en un candidato ideal para la implementación de una solución tecnológica que convine el levantamiento de datos productivos mediante la sensorización de los sistemas y la gestión de esta información, traduciéndola a indicadores de fácil lectura para la toma de decisiones críticas por parte de los niveles administrativos y operativos. Además la alta presencia de industrias con características similares, lo vuelve atractivo a la hora de generar un mayor impacto en la transformación digital de la industria manufacturera.

Así es como finalmente la empresa Metalmecánica Mekatek, interesada en la incorporación de nuevas tecnologías, accede a realizar un pilotaje del prototipo desarrollado en sus instalaciones. Particularmente la implementación se realizó en una de sus máquinas con más alta demanda, un Torno modelo DMTG CDE6266B energizado a través de una línea trifásica con un consumo a plena carga de hasta 24A.



Figura 5.8: Implementación de sistema de monitoreo de consumo eléctrico.



Figura 5.9: Interfaz local de monitoreo en operación.



Figura 5.10: Operador de torno en tareas productivas.

6. Resultados

A continuación se presentarán los resultados obtenidos después de realizar el monitoreo de las operaciones productivas del torno modelo DMTG CDE6266B. Para ello se considerará un set de datos obtenidos de una jornada de trabajo cotidiana, donde los operadores de planta comienzan sus funciones desde las 08:00 horas hasta las 18:00 horas, con una hora para almorzar.

El sistema de monitoreo despliega en la pantalla local el estado de las variables medidas cada 5 segundos, a la vez que los guarda para su posterior análisis. De estos datos se desprende lo siguiente.

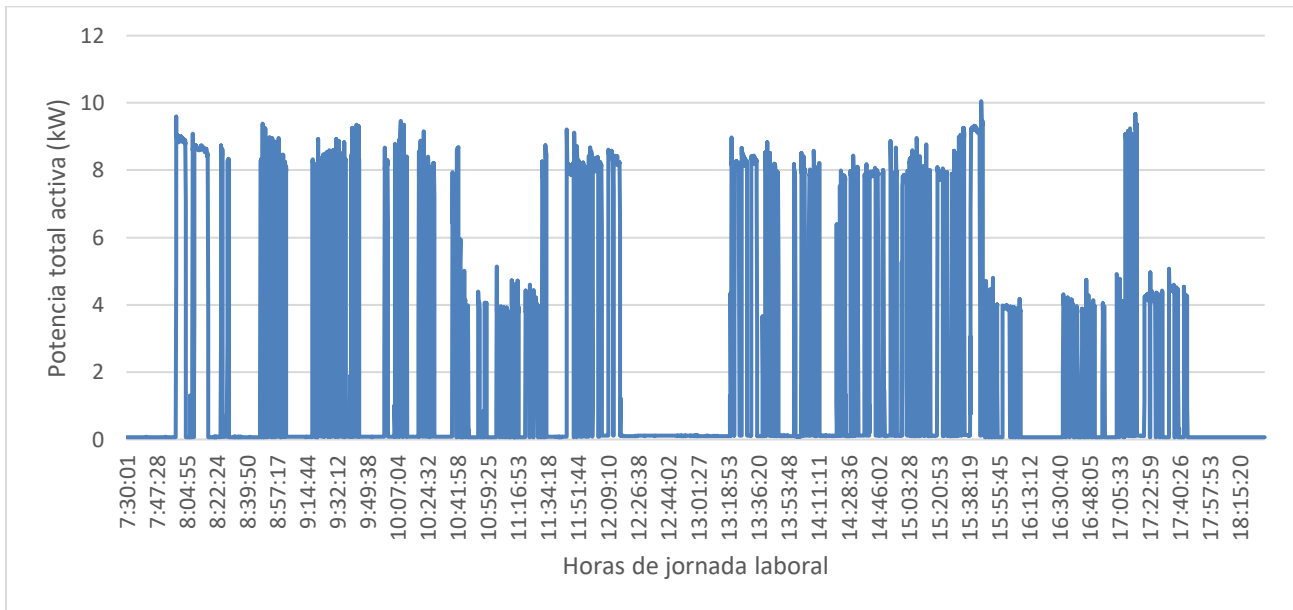


Figura 6.1: Gráfico de potencia activa utilizada en una jornada laboral.

El gráfico anterior nos entrega un resumen de la potencia activa total utilizada por la máquina durante una jornada laboral convencional. Los horarios de inicio de las funciones, su término y la hora de descanso son claramente identificables y se condicen con la información entregada por la administración de la empresa. Además, se perciben tres estados de operación:

- **Trabajo a plena carga:** Asociado a la realización efectiva de tareas de torneado de piezas, con un consumo que va desde los 7kW a los 10kW a causa de la utilización del motor principal del torno.

- **Trabajo de medición y ajuste de piezas:** A lo largo del proceso, el operador requiere verificar constantemente el avance del trabajo mediante mediciones manuales, esto puede significar realizar maniobras de cambio de piezas o de ajuste en el carril. Para ello se utilizan los motores secundarios del torno, tarea la cual se identifica en el gráfico anterior con un consumo que va de los 3,5kW a los 5kW.
- **Sin operación:** Este estado refiere a los momentos de la jornada en donde el torno se encuentra sin operación o apagado.

Finalmente para esta jornada de trabajo, los tiempos y consumos asociados a las diferentes actividades son:

Tabla 6.1: Consumo eléctrico y tiempos asociados a una jornada laboral.

Actividad	Tiempo de ejecución	Consumo eléctrico asociado (kWh)
Trabajo a plena carga	2:11:26	18,03
Trabajo de medición o ajuste	1:21:34	5,04
Sin operación	6:28:25	0,64
TOTAL	10:01:25	23,72

Además, con la información que este sistema permite adquirir, se calculan algunos de los KPIs mencionados en el capítulo 4:

$$\text{Eficiencia del trabajador} = \frac{APWT}{APAT} = \frac{9 \text{ horas}}{10 \text{ horas}} = 0,9 = \mathbf{90\%}$$

$$\text{Eficiencia de utilización} = \frac{APT}{AUBT} = \frac{131 \text{ min}}{213 \text{ min}} = 0,61 = \mathbf{61\%}$$

Otro análisis de interés consiste en el factor de potencia y sus variaciones. Este factor correspondiente a la relación entre la potencia activa y la potencia aparente está normado en Chile y es penalizado monetariamente con un 1% de la factura total, por cada centésima que este factor baje de 0,93 tomando como referencia los consumos mensuales de energía. A continuación se presenta un gráfico resumiendo las lecturas de energía activa (kWh) y reactiva (kVARh) realizadas al torno durante todo un mes de operación junto a los factores de potencia asociados a estos consumos de energía.

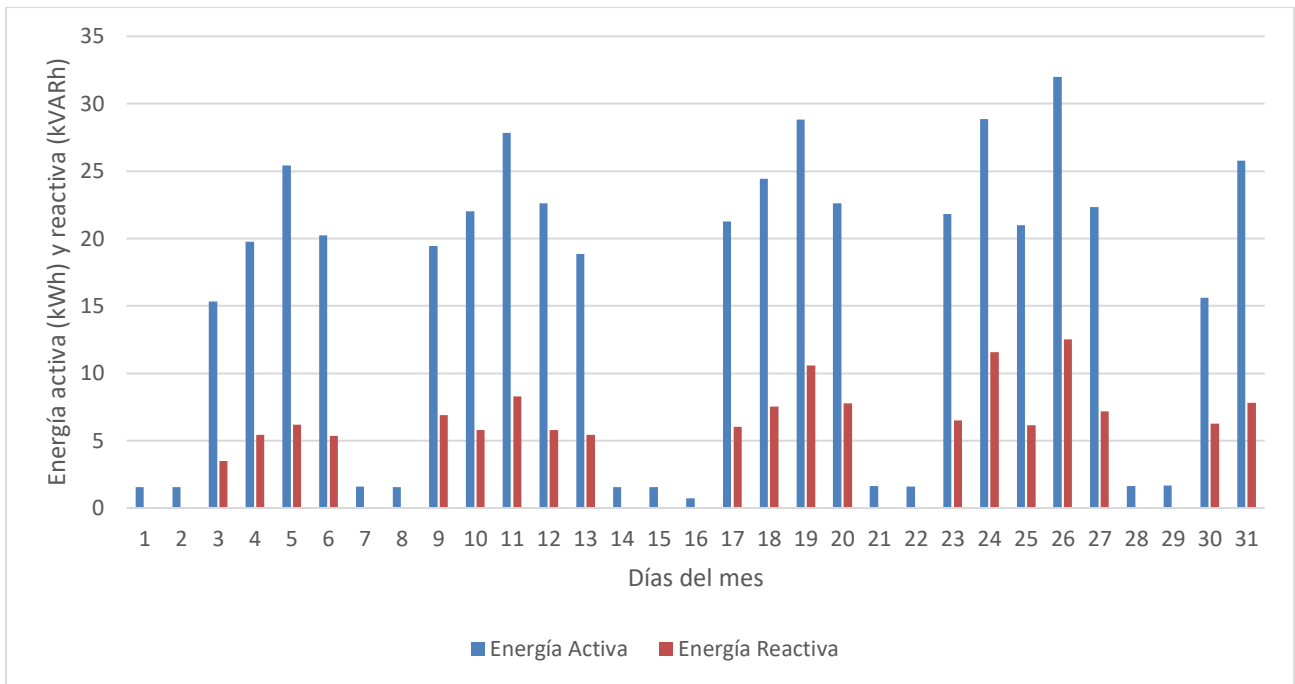


Figura 6.2: Energía activa y reactiva consumida en un mes de operación.

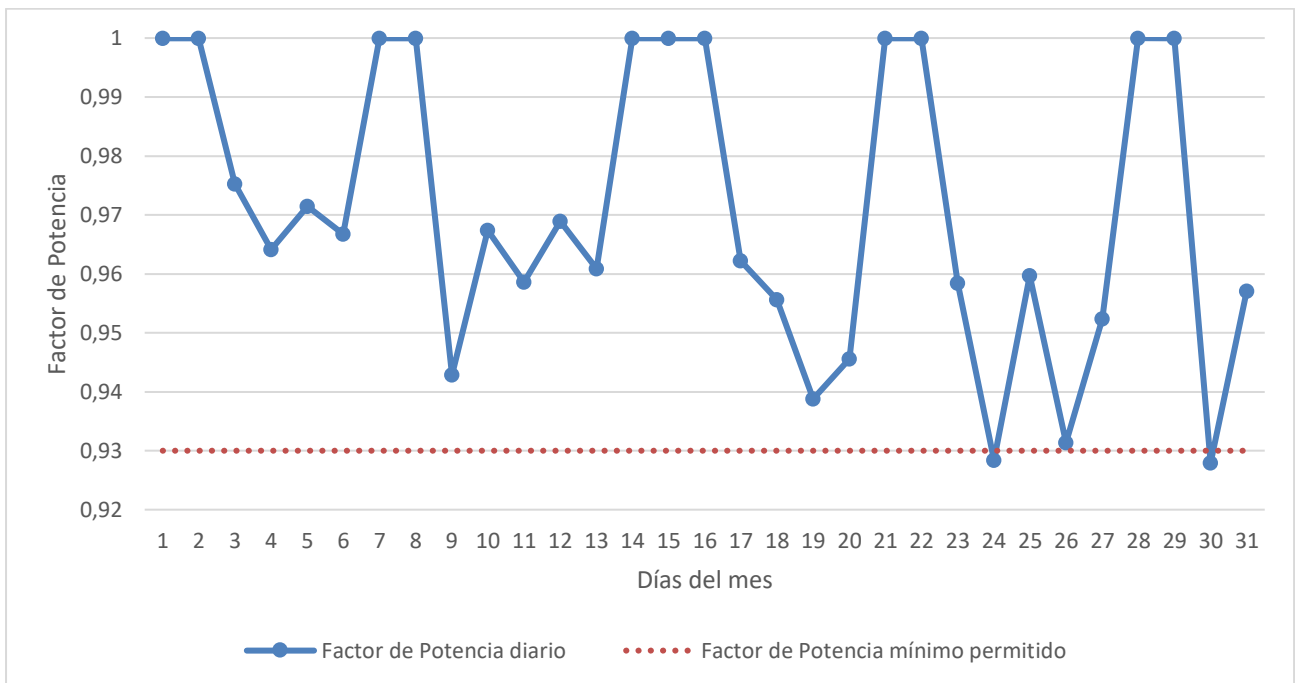


Figura 6.3: Variación de factor de potencia durante un mes de operación.

Si bien existen dos días a lo largo del mes donde el factor de potencia está por debajo de lo que la normativa vigente permite, hay que tener en cuenta que el cálculo para determinar si existe

penalización monetaria en la tarifa, se realiza en base al consumo total del mes. Así, para este mes en particular y con los datos obtenidos se realiza el cálculo de la siguiente manera:

$$FP = \frac{kWh (mes)}{\sqrt{kWh (mes)^2 + kVARh (mes)^2}} = \frac{472,60}{\sqrt{(472,60)^2 + (142,56)^2}} = \mathbf{0,95}$$

Así, podríamos decir que el factor de potencia asociado al consumo de la maquinaria estudiada, por sí sola, no representa un riesgo de multa. Sin embargo hay que tener presente que la empresa en una jornada de trabajo cotidiana mantiene en funcionamiento más unidades de trabajo con maquinaria de similares características, las que podrían aportar al empeoramiento del factor de potencia total de la empresa.

6.1. Trabajos futuros

El desarrollo expuesto anteriormente fue realizado durante la ejecución del proyecto FIC *Unidad Tecnológica para la manufactura de productos complejos avanzados*. Actualmente una nueva iniciativa FIC desarrollada por el Centro para la Industria 4.0 está siendo ejecutada bajo el nombre de *Manufactura Avanzada: Mayor productividad en Pymes*, la cual utiliza experiencias obtenidas de implementaciones anteriores basadas en tecnologías productivas, tal de desarrollar soluciones más sofisticadas, empaquetarlas e implementarlas de manera masiva junto a procedimientos y herramientas basadas en estándares como el revisado a lo largo de este documento, la ISO 22400. Así, de este desarrollo se desprenden varias líneas de trabajo futuro de que se pueden destacar:

- Implementación de HMI para recopilación de datos que permitan levantar más indicadores correspondientes al operador, sus tiempos de trabajo y notificación de fallas.
- Rediseño electrónico completo, buscando ser un dispositivo más compacto y modular.
- Monitoreo de nuevas variables tales como temperatura, humedad y vibraciones.
- Vinculación con sistema de OT tal de asignar tareas, tiempos de trabajo y costos asociados a cada máquina.
- Utilización de toroidal abierto tipo pinza para medición de corriente.
- Desarrollo de plataforma web con dashboard de KPIs basados en normativa ISO22400.

7. Conclusiones

Este estudio ha proporcionado un análisis detallado y una propuesta de implementación de Indicadores Clave de Rendimiento (KPIs) en Pymes manufactureras, basándose en la normativa ISO 22400. A través de este enfoque, se ha demostrado que es posible identificar procesos críticos, establecer objetivos claros, describir acciones operativas, determinar elementos y seleccionar KPIs, evaluar el desempeño y, finalmente, realizar acciones correctivas en favor de las expectativas. Este proceso sistemático y estructurado permite una gestión más eficiente y efectiva de los recursos y procesos en las Pymes manufactureras, contribuyendo a su competitividad y sostenibilidad.

Sin embargo, la realidad de las Pymes manufactureras, especialmente en la región estudiada, es que a menudo carecen de la infraestructura tecnológica y los conocimientos técnicos necesarios para implementar y aprovechar plenamente los KPIs y otras herramientas de gestión avanzadas. Muchas de estas empresas todavía dependen de métodos de gestión y seguimiento anticuados y manuales, lo que limita su eficiencia y capacidad para competir en un mercado cada vez más globalizado y digitalizado.

En complemento, para afrontar estas problemáticas, se ha desarrollado y probado con éxito una solución tecnológica basada en IoT para el monitoreo del consumo eléctrico. Esta solución, diseñada para ser implementada en maquinaria antigua y en condiciones de trabajo difíciles, permite la recopilación de datos precisos y en tiempo real, que son esenciales para el cálculo y la interpretación de los KPIs.

Lamentablemente, el sistema actual permite calcular solo una parte muy limitada de indicadores dada la falta de información referente a la tarea u orden de trabajo que se va a realizar en cada una de las maquinas, por lo que la implementación de una terminal en la que el operador pueda indicar el inicio y finalización de una tarea se vuelve esencial. Más cuando nuestro interés no solo se centra en la utilización optima de los equipos, sino que también en la calidad del producto final. La implementación de esta solución puede conducir a mejoras significativas en la eficiencia de los procesos y la gestión de recursos.

No obstante, la adopción de soluciones de este tipo puede enfrentar desafíos importantes. La resistencia al cambio, la falta de conocimientos técnicos y la falta de recursos para la implementación son obstáculos comunes que pueden dificultar la adopción de nuevas tecnologías en las Pymes. Además, aunque se ha proporcionado un enfoque sistemático para la selección e implementación de KPIs, la personalización de estos indicadores para las necesidades específicas de cada empresa puede requerir un esfuerzo adicional y conocimientos técnicos.

A pesar de estas limitaciones, este estudio representa un paso importante hacia la transformación digital de la industria manufacturera. Al proporcionar un enfoque sistemático para la implementación de KPIs y una solución tecnológica viable para la recopilación de datos, este estudio contribuye a los esfuerzos en curso para cerrar la brecha tecnológica en la industria manufacturera y avanzar hacia la industria 4.0.

En resumen, este estudio demuestra que la implementación de KPIs y la adopción de soluciones tecnológicas basadas en IoT pueden desempeñar un papel crucial en la mejora de la eficiencia y la gestión de recursos en las Pymes manufactureras. Sin embargo, se requiere más investigación y desarrollo para superar los desafíos asociados con la adopción de estas soluciones y para personalizar los KPIs a las necesidades específicas de cada empresa. Es imperativo que las Pymes, los gobiernos, las instituciones educativas y otras partes interesadas trabajen juntas para promover la adopción de tecnologías avanzadas y mejorar la competitividad y sostenibilidad de la industria manufacturera.

8. Referencias

- [1] L. A. M. Garcia, «Indicadores de la gestión logística», Fundación de Estudios Superiores Comfanorte, Colombia, 2016.
- [2] ISO 22400-1, «Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management - Part 1: Overview, concepts and terminology», ISO 2014, Switzerland, 2014.
- [3] ISO 22400-2, «Automation systems and integration - Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management - Part 2: Definitions and descriptions», ISO 2014, Switzerland, 2014.
- [4] K. Mahmooda, M. Lanzb, V. Toivonenb y T. Otto, «A Performance Evaluation Concept for Production Systems in an SME Network», *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 603-608, 2018.
- [5] N. Kumar y J. Kumar, «Efficiency 4. 0 for Industry 4.0», *Human Technology*, vol. 15, n° 1, pp. 55-78, 2019.
- [6] G. Hwanga, J. Leea, J. Parka y T.-W. Chang, «Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory», *International Journal of Production Research*, vol. 55, n° 9, pp. 2590-2602, 2017.
- [7] T. Parkash, C. Meshram, C.-C. Lee, R. J. Ramteke y A. L. Imoize, «Performance Measurement System and Quality Management in Data-Driven Industry 4.0: A Review», *Sensors*, vol. 22, n° 1, p. 224, 2021.
- [8] V. Vijayaraghavan y J. R. Leevinson, «Internet of things applications and use cases in the era of indutry 4.0», de *The Internet of Things in the Industrial Sector: security and device connectivity, Smart Environments, and Industry 4.0* , Springer Cham, 2019, pp. 279- 298.
- [9] M. Soori, B. Arezoo y R. Dastres, «Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review», *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 3, pp. 192 -204, 2023.
- [10] A. Behzadirad y F. Stenfors, «A study of key performance indicators (KPIs) at one of the production sites of Fresenius Kabi in Brunna, Sweden», KTH Industrial Engineering and Management, Estocolmo, 2015.
- [11] VDMA 66412-1, «Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen. », VDMA, Berlin, 2009.

- [12] AENOR UNE 66175, «Sistemas de gestión de la calidad, Guía para la implantación de sistemas de indicadores», AENOR, Madrid, 2003.
- [13] AENOR UNE-EN 15341, «Mantenimiento, Indicadores de rendimiento del mantenimiento», AENOR, Madrid, 2008.
- [14] B. C. d. Chile, «Banco Central», [En línea]. Available: https://si3.bcentral.cl/Siete/ES/Siete/Cuadro/CAP_CCNN/MN_CCNN76/CCNN2018_PIB_VIII_ACT/637899759599112876. [Último acceso: 01 Julio 2023].
- [15] INE-Chile., «Instituto Nacional de Estadísticas», [En línea]. Available: <https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/ocupacion-y-desocupacion/cuadros-estadisticos/series-vigentes/>. [Último acceso: 1 Julio 2023].
- [16] C. p. l. I. 4.0, «Diagnóstico a PYMEs del Biobío 2020: Manufactura, Innovación e Industria 4.0», Concepción, 2020.
- [17] G. R. d. Biobio, «Estrategia Regional de Desarrollo 2015 - 2030», Concepción, 2019.
- [18] C. p. l. i. 4.0, «Aplicación y Resultados de los servicios entregados por el Fpyme», Concepción, 2022.
- [19] F. Endrass, «Performance measurement using shop floor data», KTH Industrial Engineering and Management, Estocolmo, 2013.
- [20] V. Kermorgant y I. Manninen, «Implementing Web Analytics the Nokia Way: a Customer's Methodology», 12 Febrero 2015. [En línea]. Available: http://www.yolandahernandez.es/wp-content/doc/kpionline_lienzo/Implementing_WA_Nokia.pdf. [Último acceso: 20 Mayo 2023].
- [21] C. Johnsson, «Key Performance Indicators Used as Measurement Parameter for Plant-Wide Feedback Loops», de *Advances in Production Management Systems (Vol. 3, págs. 91-99)*, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [22] C.-F. Lindberg, S. Tan, J. Yan y F. Starfelt, «Key performance indicators improve industrial performance», *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1785-1790, 2015.

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA
RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO**

Departamento : Departamento de Ingeniería Eléctrica
Carrera : Ingeniería civil electrónica
Nombre del memorista : Jaime Ignacio San Martin Torres
Título de la memoria : Estrategias de implementación de sistemas IoT para medición de consumo eléctrico como indicador de productividad en pymes.
Fecha de la presentación oral : 30/08/2023
Profesor(es) guía : Pablo Aqueveque Navarro
Profesor(es) revisor(es) : Mario Medina Carrasco, Sergio Sobarzo Guzman
Concepto : Aprobado/Bueno/Muy bueno/Sobresaliente
Calificación : Nota

Resumen (máximo 200 palabras)

La implementación de KPIs en la industria manufacturera de Pymes en la región ha sido explorada, siguiendo la normativa ISO 22400. A pesar de la tecnología obsoleta y la falta de digitalización en muchas Pymes, se propuso un sistema de monitoreo de consumo eléctrico basado en IoT, demostrando su viabilidad en una empresa metalmecánica. Los resultados obtenidos, como la eficiencia del trabajador y la eficiencia de utilización, ofrecen información valiosa para la optimización de procesos. Sin embargo, la resistencia al cambio y la complejidad de la implementación de nuevas tecnologías son desafíos que aún deben ser superados. La colaboración, la innovación y un enfoque en la mejora continua son fundamentales para avanzar hacia una industria más tecnologizada y eficiente. La solución propuesta representa un paso prometedor hacia la transformación digital, pero aún hay mucho trabajo por hacer para alcanzar una industria completamente tecnologizada en el contexto de las Pymes manufactureras del Biobío.