Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

Maestría en Ingeniería y Gestión de la Calidad

Optimización del contenido de cobre en procesos industriales mediante la metodología DMAIC de Lean Six Sigma para reducir costos y mejorar la rentabilidad

---

TESIS que para obtener el **GRADO** de
MAESTRO EN INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CALIDAD

Presenta: **ING. ALAN SALVADOR MACEDO TOSCANO**

Asesor **DR. IGNACIO ÁLVAREZ PLACENCIA**

Tlaquepaque, Jalisco. 09 de mayo de 2025.

Agradecimientos

La realización de este Trabajo de Obtención de Grado ha sido posible gracias al apoyo y guía de personas fundamentales en mi formación académica y personal, a quienes expreso mi más sincero agradecimiento.

Agradezco a Dr. Ignacio Álvarez Placencia, por su orientación, paciencia y valiosas aportaciones a lo largo de esta investigación. Su acompañamiento fue clave para estructurar la metodología, interpretar los datos y consolidar los hallazgos obtenidos.

A mi familia, en especial a mis padres, Edgar Omar Macedo Diaz y María del Rayo Toscano López, por su apoyo incondicional, motivación y enseñanzas que han guiado mi camino profesional y personal. A mi hermana, Karen Arisbeth Macedo Toscano, por su compañía, y por impulsarme siempre a seguir adelante. Su respaldo ha sido esencial para culminar esta etapa con éxito.

A todos aquellos que, de una u otra manera, contribuyeron con su apoyo, conocimiento y motivación para la realización de este trabajo, les extiendo mi más profundo agradecimiento.

Tabla de contenido

GLOSARIO ..... - 6 -

INTRODUCCIÓN ..... - 10 -

CAPÍTULO 1 ..... - 12 -

FUNDAMENTACIÓN DEL TRABAJO ..... - 12 -

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN QUE SE PLANEA INTERVENIR Y SU CONTEXTO ..... - 13 -
1.2 PROBLEMÁTICA PERCIBIDA ..... - 14 -
1.3 ANÁLISIS DE ELEMENTOS DEL ENTORNO EN RELACIÓN CON LA PROBLEMÁTICA ..... - 15 -
1.4. VALIDACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LA INTERVENCIÓN ..... - 16 -
1.4.1. Project Charter ..... - 19 -
1.5 DIAGNÓSTICO PRELIMINAR: PRIMERA HIPÓTESIS ..... - 21 -
1.5.1. Mapeo de la Cadena De Valor (VSM) ..... - 22 -
1.5.2. Análisis SIPOC ..... - 26 -
1.5.3. Árbol de CTQ´s ..... - 28 -
1.5.4. ISHIKAWA ..... - 30 -
1.5.6. Análisis Pareto (ABC) ..... - 38 -
1.6 OBJETIVOS DE LA INTERVENCIÓN ..... - 45 -
1.6.1. Objetivo general: ..... - 45 -
1.6.2. Objetivos específicos: ..... - 45 -
1.6.3. Análisis FODA ..... - 46 -
1.7. RELEVANCIA Y PERTINENCIA DEL TRABAJO ..... - 49 -
1.7.1. Definición De Meta ..... - 52 -

CAPÍTULO 2 ..... - 53 -

MARCO CONCEPTUAL DE REFERENCIA ..... - 53 -

2.1. CONCEPTOS Y ENFOQUES TEÓRICOS RELACIONADOS ..... - 54 -
2.1.1. Pensamiento sistémico ..... - 55 -
2.1.2. Lean Manufacturing ..... - 55 -
2.1.3. Metodología Six Sigma y DMAIC ..... - 55 -
2.1.4. Control Estadístico de Procesos (SPC) ..... - 56 -
2.1.5. Diseño de Experimentos (DOE) ..... - 56 -
2.2. ANÁLISIS DE REFERENCIA PARA EL CAMBIO ..... - 57 -
2.2.1. Matriz de Marco Lógico ..... - 58 -
2.3. ESTADO DE LA CUESTIÓN ..... - 59 -
2.3.1 El desafío del uso eficiente del cobre en la industria ..... - 60 -
2.3.2 Impacto del sobrecontenido de cobre en procesos industriales ..... - 60 -
2.3.3 Metodologías efectivas para la mejora de procesos industriales ..... - 61 -
2.3.4 Marco regulatorio en la manufactura de cables eléctricos ..... - 61 -
2.3.5 Innovación tecnológica en el control del trefilado ..... - 61 -
2.3.6 Beneficios económicos y ambientales de la optimización del cobre ..... - 62 -

CAPÍTULO 3 ..... - 63 -

DIAGNÓSTICO PROFUNDO: MARCO DE REFERENCIA Y ESTRATEGIA DE INTERVENCIÓN ..... - 63 -

3.1. DEFINICIÓN DE LA ESTRATEGIA DE INTERVENCIÓN, SELECCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS REQUERIDAS Y EL CRONOGRAMA DEL DIAGNÓSTICO PROFUNDO ..... - 65 -
3.1.1 Análisis de Sistemas de Medición ..... *- 68 -*
3.1.2. Estudio R&R ..... *- 72 -*
3.2. DEFINICIÓN DE LOS FACTORES PRIORITARIOS A INTERVENIR ..... - 81 -
3.3. METAS DE INFORMACIÓN ..... - 84 -
3.3.1. Establecimiento de métricas base ..... *- 85 -*
3.3.2. Capacidad del proceso y estabilidad ..... *- 87 -*
3.3.3. Sigma del Proceso ..... *- 93 -*
3.3.4. Cpk y Ppk ..... *- 94 -*
3.3.5. AMEF del trefilado 500 KCM ..... *- 95 -*

CAPÍTULO 4 ..... - 97 -

IMPLEMENTACIÓN: PLANEACIÓN DE LA INTERVENCIÓN ..... - 97 -

4.1. JUSTIFICACIÓN DE LA INTERVENCIÓN ..... - 98 -
4.1.1. Validación de causa raíz. ..... *- 98 -*
4.2. ACTIVIDADES, HERRAMIENTAS E INSTRUMENTOS ..... - 100 -
4.3. ETAPAS DEL PROCESO DE APLICACIÓN DE LA INTERVENCIÓN ..... - 101 -
4.3.1. Cronograma de la implementación de la estrategia ..... *- 102 -*
4.3.2 Imprevistos ..... *- 103 -*

CAPÍTULO 5 ..... - 105 -

IMPLEMENTACIÓN: EXPOSICIÓN DE HALLAZGOS ..... - 105 -

5.1 SISTEMATIZACIÓN Y MEDICIÓN DE RESULTADOS ..... - 105 -
5.2 ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA ..... - 107 -
5.2.1 A3 Kaizen Event (VSM) ..... *- 107 -*
5.2.2 DOE 2x2 (Diseño de experimentos) ..... *- 109 -*
5.3. IMPACTO DE LA INTERVENCIÓN EN LA ORGANIZACIÓN ..... - 116 -
5.4. CONTROL Y SOSTENIBILIDAD DE LA MEJORA ..... - 122 -
5.4.1. Procedimientos estandarizados ..... *- 124 -*
5.4.2. Capacitación continua ..... *- 125 -*
5.4.3. Plan de control ..... *- 126 -*

CAPÍTULO 6 ..... - 131 -

DISCUSIÓN FINAL ..... - 131 -

6.1. RELEVANCIA Y TRASCENDENCIA DISCIPLINARIA DE LA ESTRATEGIA DE INTERVENCIÓN ..... - 133 -
6.2. APORTES PERSONALES Y PROFESIONALES ..... - 136 -
6.3. ASPECTOS DE MEJORA PARA FUTURAS INTERVENCIONES ..... - 137 -

CONCLUSIONES ..... - 139 -

BIBLIOGRAFÍA ..... - 141 -

Abstract

Este estudio se enfoca en optimizar el contenido de cobre durante la manufactura del cable 500 KCM, empleando un enfoque estructurado basado en la metodología DMAIC de Lean Six Sigma. Se integraron herramientas como SIPOC, diagrama de Ishikawa, Diseño de Experimentos (DOE), análisis de capacidad y estudios R&R, con el propósito de reducir de manera efectiva y sostenible el sobrecontenido de cobre. Como resultado, se logró una disminución del 0.11 % en el contenido excedente de cobre, lo que representó un impacto económico estimado superior a $100,000 MXN en un periodo de cinco meses.

Adicionalmente, la intervención generó beneficios operativos como la estandarización de parámetros críticos de operación, la mejora en la precisión de los sistemas de medición y el fortalecimiento de la cultura de mejora continua dentro de la organización.

En conclusión, los resultados confirman que la aplicación disciplinada de Lean Six Sigma permite obtener mejoras significativas, sostenibles y medibles, incluso en procesos previamente optimizados.

Palabras clave: sobrecontenido; diseño de experimentos; optimización de procesos; Lean Six Sigma; DMAIC.

Glosario

5S: Metodología japonesa de mejora continúa enfocada en la organización y limpieza del área de trabajo. Sus principios son: Seiri (Clasificar), Seiton (Ordenar), Seiso (Limpiar), Seiketsu (Estandarizar) y Shitsuke (Disciplina).

AMFE (Análisis Modal de Fallos y Efectos): Herramienta de gestión de calidad utilizada para identificar y evaluar riesgos en un proceso, producto o sistema.

Capacidad del proceso (Cpk, Ppk): Indicadores estadísticos que miden qué tan bien un proceso cumple con los límites de especificación establecidos.

DMAIC: De acuerdo con George (2005) es una metodología de mejora continúa utilizada en Lean Six Sigma que consta de cinco fases: **Definir, Medir, Analizar, Mejorar (Improve) y Controlar**.

DOE (Diseño de Experimentos): El Diseño de Experimentos (DOE), como lo describe Montgomery (2019), permite identificar relaciones causales entre variables y optimizar parámetros operativos de manera estadísticamente robusta.

Kaizen: Filosofía de mejora continua enfocada en la eliminación de desperdicios y la eficiencia operativa mediante pequeños cambios incrementales.

Lean Manufacturing: Estrategia de manufactura enfocada en la reducción de desperdicios y mejora de eficiencia en los procesos productivos.

R&R (Repetibilidad y Reproducibilidad): Estudio que evalúa la confiabilidad del sistema de medición, determinando si la variabilidad de las mediciones proviene del instrumento o del operador.

SPC (Control Estadístico de Procesos): Técnica basada en el uso de gráficos de control para monitorear la estabilidad de un proceso y detectar variaciones no deseadas.

Trefilado: Proceso de manufactura en el que un alambre o cable es pasado a través de una serie de dados para reducir su diámetro y mejorar sus propiedades mecánicas.

Índice de siglas

AIAG: Automotive Industry Action Group

AMEF: Análisis de Modo y Efecto de Fallas

ANCE: Asociación de Normalización y Certificación A.C.

CTQ: Critical to Quality

DOE: Design of Experiments (Diseño de Experimentos)

ERP: Enterprise Resource Planning (Planificación de Recursos Empresariales)

KCM: Thousand Circular Mils (milésimas de pulgada circular – unidad de medida eléctrica)

LB: Línea Base

MR: Mejor Resultado

NMX: Norma Mexicana

NPR: Número de Prioridad de Riesgo

OEE: Overall Equipment Effectiveness (Eficiencia General de los Equipos)

PDCA: Plan, Do, Check, Act

R&R: Repeatability and Reproducibility (Repetibilidad y Reproducibilidad)

SPI: Sistema de Participación e Involucramiento

TOG: Trabajo de Obtención de Grado

VSM: Value Stream Mapping (Mapeo de la Cadena de Valor)

VOC: Voice of the Customer (Voz del Cliente)

Índice de Figura

Figura 1 ..... *- 19 -*
Figura 2 ..... *- 21 -*
Figura 3 ..... *- 22 -*
Figura 4 ..... *- 23 -*
Figura 5 ..... *- 24 -*
Figura 6 ..... *- 26 -*
Figura 7 ..... *- 28 -*
Figura 8 ..... *- 30 -*
Figura 9 ..... *- 32 -*
Figura 10 ..... *- 33 -*
Figura 11 ..... *- 35 -*
Figura 12 ..... *- 36 -*
Figura 13 ..... *- 39 -*
Figura 14 ..... *- 40 -*
Figura 15 ..... *- 41 -*
Figura 16 ..... *- 42 -*
Figura 17 ..... *- 43 -*
Figura 18 ..... *- 67 -*
Figura 19 ..... *- 69 -*
Figura 20 ..... *- 70 -*
Figura 21 ..... *- 70 -*
Figura 22 ..... *- 71 -*
Figura 23 ..... *- 72 -*
Figura 24 ..... *- 73 -*
Figura 25 ..... *- 74 -*
Figura 26 ..... *- 75 -*
Figura 27 ..... *- 76 -*
Figura 28 ..... *- 77 -*
Figura 29 ..... *- 78 -*
Figura 30 ..... *- 79 -*
Figura 31 ..... *- 81 -*
Figura 32 ..... *- 89 -*
Figura 33 ..... *- 90 -*
Figura 34 ..... *- 92 -*
Figura 35 ..... *- 93 -*
Figura 36 ..... *- 96 -*
Figura 37 ..... *- 97 -*
Figura 38 ..... *- 108 -*
Figura 39 ..... *- 111 -*
Figura 40 ..... *- 112 -*
Figura 41 ..... *- 113 -*
Figura 42 ..... *- 114 -*
Figura 43 ..... *- 115 -*
Figura 44 ..... *- 117 -*
Figura 45 ..... *- 118 -*

Figura 46 ..... *- 124 -*
Figura 47 ..... *- 125 -*
Figura 48 ..... *- 126 -*
Figura 49 ..... *- 127 -*
Figura 50 ..... *- 127 -*
Figura 51 ..... *- 129 -*

Índice de Tablas

Tabla 1 ..... *- 44 -*
Tabla 2 ..... *- 48 -*
Tabla 3 ..... *- 51 -*
Tabla 4 ..... *- 52 -*
Tabla 5 ..... *- 59 -*
Tabla 6 ..... *- 66 -*
Tabla 7 ..... *- 68 -*
Tabla 8 ..... *- 80 -*
Tabla 9 ..... *- 82 -*
Tabla 10 ..... *- 85 -*
Tabla 11 ..... *- 86 -*
Tabla 12 ..... *- 88 -*
Tabla 13 ..... *- 91 -*
Tabla 14 ..... *- 102 -*
Tabla 15 ..... *- 110 -*
Tabla 16 ..... *- 116 -*
Tabla 17 ..... *- 120 -*
Tabla 18 ..... *- 122 -*
Tabla 19 ..... *- 123 -*

INTRODUCCIÓN

En el campo de la Ingeniería y Gestión de la Calidad, uno de los retos constantes dentro de la industria manufacturera es lograr la optimización de los procesos productivos, enfocándose especialmente en la reducción de desperdicios y el uso eficiente de materias primas críticas como el cobre. La fabricación de cables eléctricos de baja tensión depende en gran medida de este material, cuyo elevado costo impacta directamente en los márgenes de ganancia y la competitividad del producto final. Por ello, esta investigación se integra en la conversación disciplinar de la mejora continua y la aplicación de metodologías como Lean Six Sigma, con el fin de intervenir sobre la problemática del sobrecontenido de cobre presente en el proceso de trefilado del cable 500 KCM, buscando garantizar el equilibrio entre rentabilidad, calidad y cumplimiento normativo.

Sin embargo, a pesar de contar con procedimientos estandarizados, sistemas de inspección y recursos tecnológicos avanzados, la organización analizada enfrenta pérdidas económicas derivadas de desviaciones en el contenido de cobre que superan los límites óptimos establecidos. Estas desviaciones afectan no solo el costo operativo, sino también la estabilidad del proceso y la eficiencia global del sistema productivo. Atender esta situación es fundamental, ya que representa una oportunidad de intervención que puede generar beneficios financieros, tecnológicos y operativos, además de contribuir a fortalecer las capacidades de análisis y solución de problemas dentro del área funcional involucrada.

El objetivo de este trabajo es reducir el sobrecontenido de cobre del cable 500 KCM, que partía de un valor promedio del 0.25%, hasta alcanzar un nivel controlado del 0.13%, mediante el desarrollo e implementación de una estrategia de intervención basada en la metodología DMAIC. Para lograrlo, se realizó un diagnóstico integral del proceso, identificando y analizando las variables críticas involucradas, así como el diseño y aplicación de pruebas controladas que permitieron optimizar parámetros operativos clave y establecer nuevos estándares para el área de trefilado.

Los resultados de la intervención evidencian una disminución significativa en el sobrecontenido de cobre, con impactos económicos positivos derivados del ahorro en materia prima y la mejora en la estabilidad del proceso. Esto permitió validar la efectividad de la estrategia planteada y dejó bases sólidas para replicar mejoras en otros productos y procesos dentro de la organización, demostrando la relevancia de aplicar herramientas de calidad y mejora continua en problemas de alto impacto operativo y financiero.

Esta intervención aporta una contribución significativa al campo de la mejora continua aplicada a la industria manufacturera, al demostrar que la metodología DMAIC puede generar impactos económicos, operativos y de calidad sostenibles cuando se implementa en procesos de manufactura de conductores eléctricos.

Este documento se estructura en seis capítulos. El capítulo 1 presenta la fundamentación de la intervención, el capítulo 2 expone el marco conceptual, el capítulo 3 desarrolla el diagnóstico profundo, el capítulo 4 detalla la planeación de la intervención, el capítulo 5 expone los hallazgos obtenidos y el capítulo 6 discute las implicaciones, limitaciones y recomendaciones futuras.

CAPÍTULO 1

Fundamentación del trabajo

El presente capítulo tiene como finalidad fundamentar, con rigor técnico y académico, la problemática identificada dentro del proceso productivo de una empresa especializada en la manufactura de conductores eléctricos de baja tensión, enfocándose específicamente en la presencia de sobrecontenido de cobre en el cable 500 KCM. Al tratarse de un insumo de alto costo y relevancia estratégica, el control de su uso impacta directamente en la rentabilidad del negocio y en la estabilidad operativa de la organización. Por ello, resulta indispensable realizar un análisis integral que permita comprender las causas de esta desviación y establecer alternativas de solución sustentadas en metodologías de mejora continua.

Siguiendo el enfoque de diagnóstico aplicado en la materia de IDI I, se procederá a examinar los “signos vitales” de la organización, es decir, los principales indicadores relacionados con su desempeño financiero, comercial y productivo, así como los factores internos y externos que inciden en el problema de estudio. A partir de este análisis, será posible describir con precisión la situación actual de la empresa y determinar cómo la problemática del sobrecontenido afecta sus costos, procesos y competitividad en el mercado.

Este capítulo sienta las bases para el desarrollo del Trabajo de Obtención de Grado (TOG), proporcionando los elementos necesarios para validar la pertinencia de la intervención, justificar la relevancia de la problemática y definir los objetivos estratégicos del proyecto. Asimismo, su contenido permite orientar tanto a la coordinación académica como a los posibles tutores sobre el alcance y profundidad del trabajo, garantizando que la intervención propuesta se construya sobre un diagnóstico sólido y bien fundamentado.

1.1 Descripción de la organización que se planea intervenir y su contexto

Esta intervención se desarrolla dentro de una empresa dedicada a la fabricación de cables eléctricos de baja tensión, con experiencia consolidada en el mercado nacional y regional. La organización cuenta con procesos especializados en la transformación de cobre y aplicación de recubrimientos aislantes, ofreciendo soluciones orientadas a sectores como la construcción, infraestructura eléctrica y distribución de energía.

La estructura organizacional de la empresa se divide en áreas operativas y administrativas, destacando los departamentos de Producción, Calidad, Mantenimiento y Logística, que trabajan de manera coordinada para asegurar la continuidad operativa y el cumplimiento de los estándares requeridos. Particularmente, el área de trefilado es fundamental dentro del proceso productivo, ya que es responsable de transformar el alambrón de cobre en alambres de diámetros específicos, que serán integrados posteriormente en distintos tipos de cables eléctricos.

La propuesta de valor de la organización se enfoca en ofrecer productos que cumplan con los más altos estándares de calidad, eficiencia y seguridad, de acuerdo con las normativas vigentes para el sector eléctrico. Entre las principales regulaciones aplicables se encuentran las emitidas por organismos de normalización como la ANCE, que establecen las dimensiones mínimas, materiales y características técnicas que deben cumplir los productos finales para garantizar su correcto funcionamiento y seguridad.

Actualmente, la organización enfrenta el desafío de optimizar el consumo de cobre, dado su elevado costo y la alta volatilidad de su precio en el mercado internacional. Esta condición impacta directamente los costos de producción y, en consecuencia, la competitividad del negocio. En este contexto, se ha identificado una problemática relevante en el proceso de trefilado del cable 500 KCM, donde se han detectado

desviaciones asociadas al sobrecontenido de cobre. Estas desviaciones generan pérdidas económicas significativas al incrementar el consumo del insumo principal, afectando los márgenes de rentabilidad. Por tanto, se requiere una intervención estructurada orientada a la mejora del proceso, con el objetivo de reducir el sobrecontenido sin comprometer la calidad del producto ni el cumplimiento de los requisitos normativos establecidos.

Este contexto operacional establece claramente los límites y alcances específicos del análisis técnico desarrollado en este trabajo.

1.2 Problemática percibida

En esta etapa, se implementan diversas metodologías de calidad para enriquecer el análisis. Estas metodologías incluyen variantes y apoyos que permiten un diagnóstico más completo y preciso del problema.

Primero, se realiza una recopilación exhaustiva de datos relevantes, utilizando herramientas como encuestas, entrevistas y análisis de documentos. Esta información se analiza para identificar patrones y tendencias que puedan indicar la raíz del problema.

Para un análisis más detallado, se utilizarán los siguientes métodos de calidad:

- SIPOC (Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers): Para mapear y entender los elementos clave del proceso.
- VSM (Value Stream Mapping): Para visualizar y analizar el flujo de materiales e información.
- CTQ (Critical to Quality): Para identificar los atributos críticos que afectan la calidad del producto o servicio.
- Análisis de Pareto: Para priorizar las causas del problema basándose en el principio de que el 80% de los efectos provienen del 20% de las causas.
- Diagrama de Flujo: Para representar gráficamente el proceso y sus pasos.

- Análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas): Para evaluar los factores internos y externos que pueden influir en el problema.

La integración secuencial de estas herramientas asegura un diagnóstico profundo, permitiendo la identificación precisa de la causa raíz que afecta el sobrecontenido de cobre.

1.3 Análisis de elementos del entorno en relación con la problemática

El sector de fabricación de cables eléctricos es altamente dependiente de la disponibilidad y costos de materias primas como el cobre, así como de factores externos que impactan directa o indirectamente su operación. Entre los aspectos más relevantes destacan las variaciones económicas globales, los avances tecnológicos aplicados al control de procesos y las normativas técnicas que regulan la calidad de los productos eléctricos. Estos elementos del entorno inciden directamente en la problemática de sobrecontenido de cobre identificada en el proceso de trefilado del cable 500 KCM.

Desde el ámbito económico, la volatilidad del precio internacional del cobre representa una de las mayores amenazas para la rentabilidad del sector. De acuerdo con el (Banco Mundial, 2023) el precio promedio del cobre en los últimos años ha mostrado fluctuaciones considerables, derivadas de factores como la desaceleración económica global, la demanda del sector energético y la incertidumbre geopolítica. Estas variaciones incrementan la presión sobre las empresas para optimizar su consumo de cobre y evitar desperdicios, ya que cada incremento en el sobrecontenido genera pérdidas financieras significativas.

En términos tecnológicos, la industria enfrenta el desafío de mantenerse actualizada con herramientas que permitan un mayor control del proceso productivo. La incorporación de tecnologías como medidores láser en línea, sistemas de monitoreo de variables críticas y softwares especializados de análisis estadístico se ha vuelto indispensable para garantizar la estabilidad del proceso y minimizar las desviaciones (Montgomery, 2020). La inversión en estas tecnologías, aunque

elevada, es una oportunidad estratégica para mantener la competitividad y asegurar productos dentro de especificaciones normativas, evitando sanciones o devoluciones.

Desde la perspectiva normativa, la fabricación de cables eléctricos en México se encuentra regulada por estándares oficiales que definen las características físicas y eléctricas mínimas de los productos. Normas como la Asociación de Normalización y Certificación A.C. 2018 y la Asociación de Normalización y Certificación A.C. 2019 establecen los requisitos dimensionales y de resistencia eléctrica, como los límites de variación aceptables para el diámetro de conductores eléctricos de baja tensión, lo que limita la posibilidad de reducir el contenido de cobre por debajo de ciertos límites. Esto obliga a las organizaciones a buscar estrategias de optimización que reduzcan el sobrecontenido sin comprometer la conformidad normativa ni la calidad final del producto.

En cuanto a los factores medioambientales, existe una tendencia creciente hacia la eficiencia en el uso de recursos no renovables y la disminución de residuos industriales. De acuerdo con (International Copper Association, 2022), la reducción de pérdidas de cobre durante los procesos productivos contribuye de manera significativa a los objetivos de sostenibilidad y a la disminución de la huella ambiental de las empresas del sector.

En conclusión, el entorno actual presenta amenazas significativas relacionadas con el costo del cobre y las exigencias normativas, pero también abre oportunidades mediante la adopción de tecnologías avanzadas, la mejora continua de los procesos y el fortalecimiento de prácticas sostenibles que impacten positivamente en la rentabilidad y competitividad de las organizaciones del sector.

1.4. Validación de las condiciones de la intervención

Para asegurar la viabilidad del proyecto, se ha realizado una evaluación de los recursos, actores clave y condiciones organizacionales que permitirán su implementación efectiva.

Factores clave para la intervención:

Disponibilidad de recursos: La empresa cuenta con herramientas de medición como medidores láser y un ERP con trazabilidad del cobre, lo que permite la recolección de datos de manera confiable.

Participación de actores clave: Se ha asegurado el involucramiento del personal de producción, calidad y mantenimiento, garantizando acceso a la información necesaria para el análisis del proceso.

Tiempo de implementación: La planeación de actividades permite que el proyecto se ejecute dentro del marco académico del programa de maestría, minimizando el impacto en las operaciones diarias.

Alineación con objetivos estratégicos: La empresa ha identificado la reducción del sobrecontenido de cobre como una prioridad dentro de sus planes de mejora continua.

Con base en estos elementos, se concluye que existen las condiciones necesarias para llevar a cabo el proyecto dentro del periodo académico establecido, garantizando su continuidad y sostenibilidad (George, 2005).

Delimitación y área funcional por intervenir

Para garantizar un enfoque preciso en la intervención propuesta, es fundamental establecer una delimitación clara del problema en relación con el área funcional en la que se implementarán las acciones de mejora. En este sentido, el proyecto se centrará en el proceso de trefilado dentro de la fabricación del cable 500 KCM, específicamente en la gestión del sobrecontenido de cobre. Esta delimitación responde a la relevancia operativa y económica del problema, así como a la viabilidad de intervención dentro del periodo de ejecución establecido.

Definición del alcance del problema

El sobrecontenido de cobre identificado en la producción del cable 500 KCM impacta directamente los costos de fabricación y la eficiencia del proceso. Aunque la

producción de otros calibres también podría presentar desviaciones en el contenido de cobre, el análisis preliminar basado en el principio de Pareto (Juran, 2001), determinó que el mayor impacto económico y operativo se encuentra en este calibre en particular. Por ello, se ha definido como el foco principal del estudio, asegurando que los esfuerzos de optimización generen beneficios tangibles en términos de reducción de desperdicio y mejora del control del proceso.

Área funcional de intervención

La intervención se llevará a cabo en el área de trefilado, que es responsable de la reducción del diámetro del alambrón de cobre hasta obtener el calibre deseado para su posterior procesamiento. Esta fase es crítica dentro de la cadena de valor, ya que cualquier desviación en el diámetro final del conductor influye directamente en el contenido de cobre del cable terminado (Montgomery, 2020). Además, el área de trefilado es el punto en el que se pueden implementar estrategias de mejora enfocadas en el control de variables clave como el desgaste de dados, la velocidad de línea y la tensión aplicada al material.

Justificación de la delimitación

La delimitación del problema y del área de intervención se realizó en coordinación con los actores clave identificados, asegurando que el proyecto sea viable y alineado con los objetivos estratégicos de la organización. Se tomó en cuenta la accesibilidad a datos históricos del proceso, la factibilidad de realizar ajustes operativos dentro del área de trefilado y la disponibilidad de herramientas tecnológicas para medir y analizar las mejoras implementadas.

Además, este enfoque permite aplicar la metodología DMAIC de manera estructurada, concentrando los esfuerzos en una sola fase del proceso productivo y facilitando el control de variables durante la intervención (George, 2005). De esta manera, se establece un marco claro de acción que permite evaluar el impacto de las mejoras con precisión y generar resultados replicables en otros calibres de cable en futuras fases del proyecto.

En conclusión, la delimitación del problema y del área funcional garantiza un abordaje específico y medible, facilitando la implementación de estrategias de optimización y asegurando la sostenibilidad de los resultados obtenidos.

Por ello, se establece e incluye una caratula de proyecto que será presentado a dirección para su validez y formalidad.

1.4.1. Project Charter

Figura *1*

Caratula del proyecto presentado a la compañía para su realización

ID del Proyecto	**1**
Título del Proyecto	Optimización del contenido de cobre en procesos industriales mediante la metodología DMAIC de Lean Six
Unidad de Negocio / Función Corporativa Líder	Alan Salvador Macedo Toscano
Subestructura de la BU/CF	Ingenieria, Producción, Calidad, Técnico.
Ubicación	Guadalajara, Jalisco, México.
Área del Proyecto	Aseguramiento de la Calidad
Función Líder	Ingeniero de Calidad
Estado	Completado
Inicio del Proyecto	ene-24
Fin del Proyecto	feb-25
Fecha de Aprobación de Finalización	feb-24
Situación Actual / Descripción del Problema	El S 500 KCM KCMIL es el producto que más sobre contenido presenta, con un 0.25% de sobre contenido promedio mensual, por lo que se deben tomar acciones en este calibre para su reducción.
Situación Futura / Objetivos del Proyecto	Reducción del procentaje de sobrecontenido de Cu del cable 500 KCM de 0.25% a 0.13%

Acciones de Mejora / Hitos

Definir	Recolección de datos (Históricos de producción y datos de sobre contenido)	Analizar	Identificación de causas potenciales
	Revisión y diagnostico del problema		Lluvias de ideas para el llenado del Ishikawa en reuniones GNT
	Mapeo del proceso y Project charter		Verificar causar raíz
	Justificación y definición de objetivos	Mejorar	Seleccionar soluciones y desarrollo de plan de mejora
Medir	Verificación del MSA		VSM Futuro (A3)
	Aplicación de R&R para la toma de muestra de sobre contenido		DOE 2x2
	Medición por medidor láser en línea de proceso		Medir y verificar el desempeño mejorado
	Capacidad de proceso	Controlar	Desarrollo y documentación para la estandarización
	Capacitación a inspectores de calidad para aumentar R&R		Monitoreo del desempeño
ENERO 2024- FEBRERO 2025			Plan de control futuro y conclusiones

Enfoque CBS	Sustainability, Flow, Reliability, Simplicity, Involvement & Flow			
Patrocinador	Aréa Técnica y Aseguramiento de la Calidad			
Comité Directivo	ASMT, QM, TD			
Gerente del Proyecto	JLP			
Miembros del Equipo	Ingenieria, Producción, Calidad, Técnico.			
Coach CBS BU/CF	N/A			
Coach(es) Local(es)/del Proyecto	DR. IGNACIO ÁLVAREZ PLACENCIA			
Esfuerzos Financieros	Compañía			
Resultados Cualitativos Alcanzados				
Especificaciones de los KPIs	Value Before	Value After	Direction	Change (%)
KPI "1" (Nombre y Dimensión)	**COSTO DE TRANSFORMACIÓN Cu $/KG**			
KPI "1" (Valores)	0.25%	0.13%	*Reduction*	0.12%
KPI "2" (Nombre y Dimensión)	**OEE**			
KPI "2" (Valores)	65	67	*increase*	2%
OPE	85%			
Comentarios	Proyecto de intervención aplicado también al proyecto de titulación de Alan Macedo, desarrollado por el equipo en conjunto de la compañía y liderado por Alan.			

Nota: Esta Figura muestra cómo se formaliza el inicio de un proyecto y proporcionar una visión general de los objetivos, alcances y estructura organizativa. Elaboración propia (2025).

Este análisis confirma que las condiciones son adecuadas para proceder con una intervención basada en datos y análisis estadísticos sólidos (Montgomery, 2020).

1.5 Diagnóstico preliminar: primera hipótesis

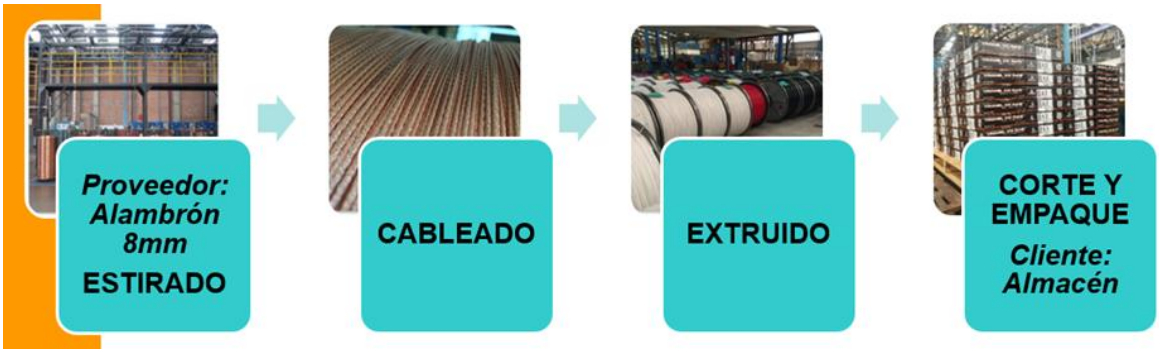
El análisis preliminar de la problemática permite identificar que el sobrecontenido de cobre en la fabricación del cable 500 KCM no es un fenómeno aislado, sino que responde a una serie de interacciones complejas entre variables técnicas, operativas y organizacionales dentro de la empresa. Aunque el impacto directo se refleja en los costos de producción, las causas que lo originan están vinculadas a múltiples factores distribuidos en distintas áreas funcionales, lo que obliga a adoptar una visión sistémica y multidisciplinaria del problema (Checkland, 2008).

Para este primer diagnóstico, se utilizarán una serie de herramientas para la calidad, para poder identificar y tener una visión más clara de la problemática; a continuación, se detallan las herramientas y lo encontrado en cada una:

Se inicia con un diagrama de flujo de nuestro proceso, comprendiendo las áreas y la continuidad que tiene el material.

Figura 2

Diagrama de flujo del proceso productivo del Cable



Nota: Diagrama grafico del proceso para la fabricación de un cable conductor de baja tensión, iniciando por el proceso de estirado y terminando en corte y empaque. Elaboración propia (2025).

El diagrama de flujo del proceso mostrado en la Figura 2 permite visualizar las principales etapas involucradas en la fabricación del cable 500 KCM. Aunque presenta una estructura lineal clara, desde el estirado del alambrón hasta el corte y empaque, no refleja controles intermedios sobre el diámetro del conductor ni evidencia mecanismos de retroalimentación operativa durante el trefilado.

Esto es relevante, ya que en esta etapa se define la cantidad de cobre utilizada en cada metro de cable. La ausencia de controles visibles y la posible variabilidad en la reducción del diámetro podrían ser factores directamente asociados al sobrecontenido de cobre observado en la producción.

A partir de esta observación, se identificó que el proceso carece de controles visuales y de retroalimentación efectiva, particularmente en la etapa de trefilado. Esta etapa es crítica, ya que define el consumo de cobre por unidad de producto. Ante la falta de mecanismos de monitoreo en tiempo real, cualquier desviación en el diámetro impacta directamente en el contenido del material.

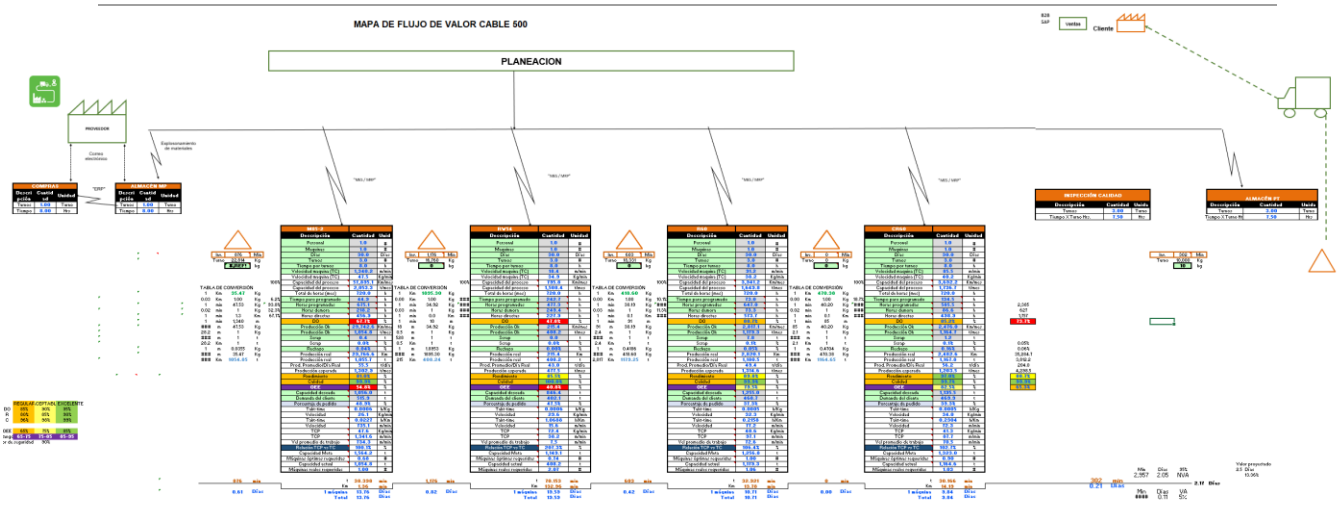
Para abordar esta deficiencia, se implementó un Mapa de Cadena de Valor (VSM) enfocado únicamente en la fabricación del calibre 500 KCM. Esta herramienta complementa al diagrama de flujo, pues no solo describe la secuencia operativa, sino que integra datos cuantitativos como tiempos VA/NVA, eficiencia OEE, inventarios y comunicación interdepartamental. Al hacerlo, permite vincular la problemática del sobrecontenido con el desempeño operativo general y facilita la identificación de focos específicos de intervención.

1.5.1. Mapeo de la Cadena De Valor (VSM)

El Value Stream Mapping (VSM) se utiliza para mapear el proceso y detectar variantes que puedan influir en la reducción del sobrecontenido, con un enfoque específico en el proceso de fabricación del producto calibre 500 KCM.

Figura 3

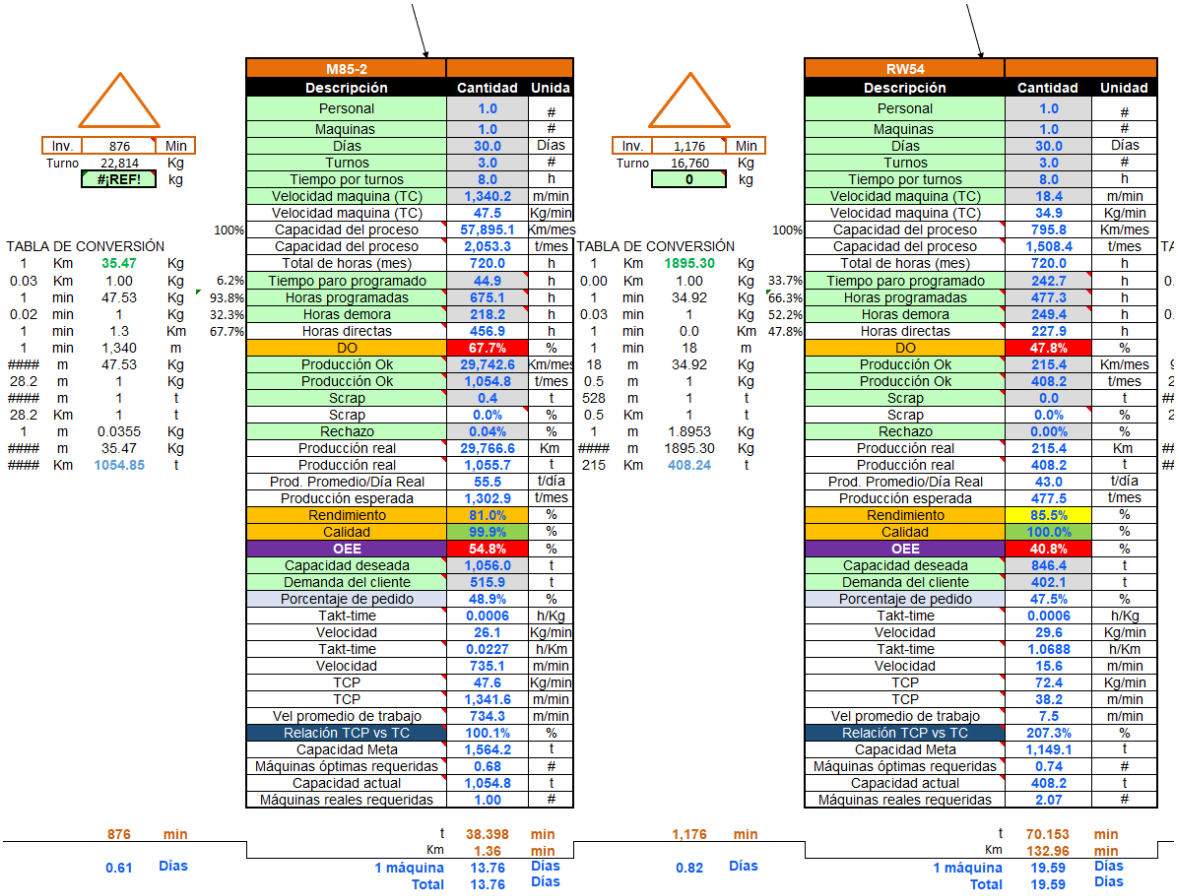
Mapa de Cadena de Valor para el Cable 500 KCM



Nota: Se elaboró el VSM considerando únicamente el proceso para el cable 500 KCM, ya que es el material al que se busca optimizar su contenido. Elaboración de las áreas de calidad/técnico/producción de la compañía (2025).

Figura 4

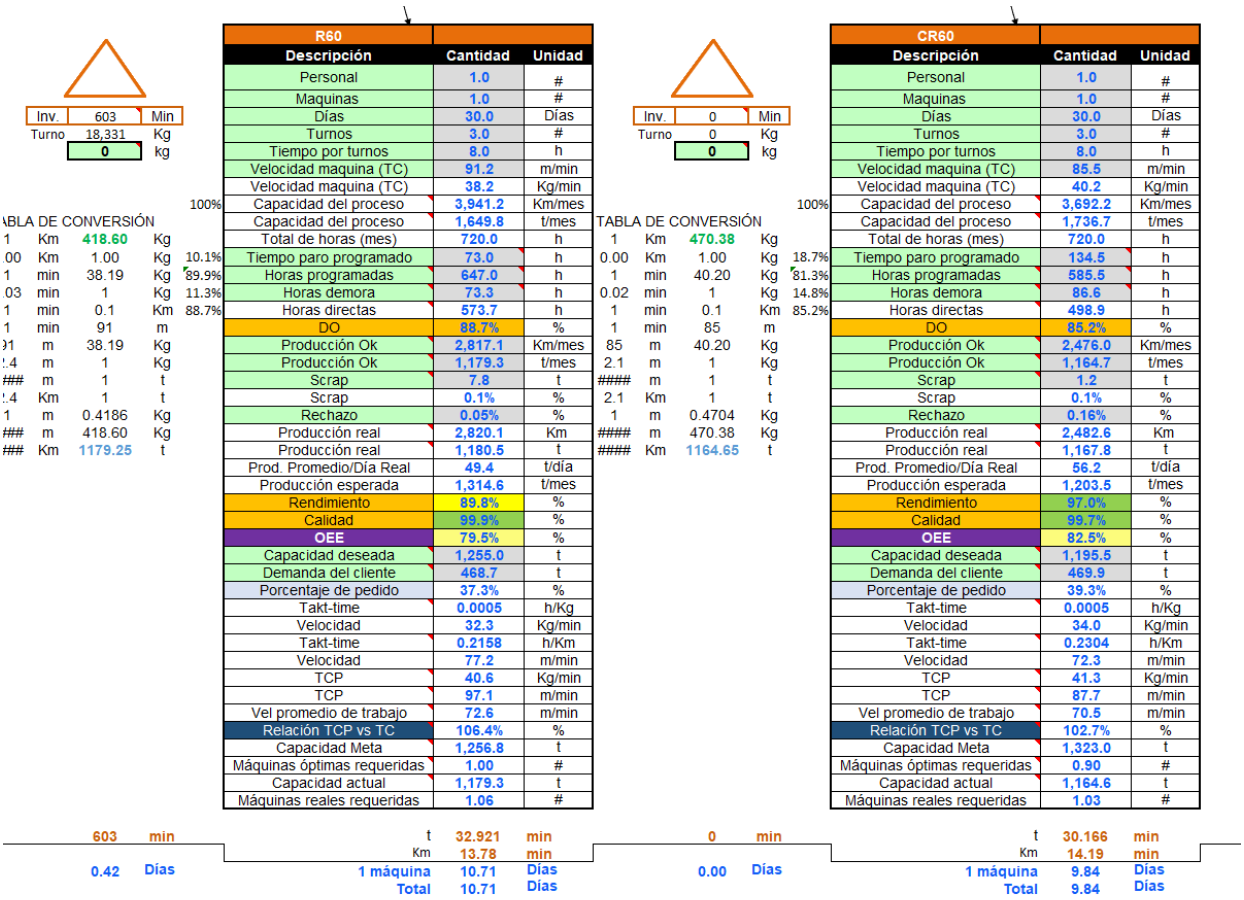
Primeros dos procesos del VSM



Nota: se colocan para mejor visualización los primeros dos cajas de datos involucrados al proceso de fabricación del cable. Elaboración de las áreas de calidad/técnico/producción de la compañía (2025).

Figura 5

Dos últimos procesos del VSM



Nota: se colocan para mejor visualización las dos últimas cajas de datos involucrados al proceso de fabricación del cable. Elaboración de las áreas de calidad/técnico/producción de la compañía (2025).

El Mapa de Flujo de Valor (VSM) presentado en la Figura 3 representa el flujo completo de materiales e información involucrado en la producción del cable 500 KCM, desde el proveedor hasta el cliente, pasando por cada proceso clave de la manufactura (4 areas). Está alineado a la metodología Lean Manufacturing, integrando tanto tiempos de valor agregado (VA) como no valor agregado (NVA), cálculo de la OEE (lo cual permite correlacionar la eficiencia operativa con el desperdicio de cobre), personal, maquina, inventario por proceso, datos operativos que se llenan de acuerdo con la planeación mensual, que, para este escenario, fue un consolidado de 3 meses, ya que algunos datos como el takt time no tomarían relevancia.

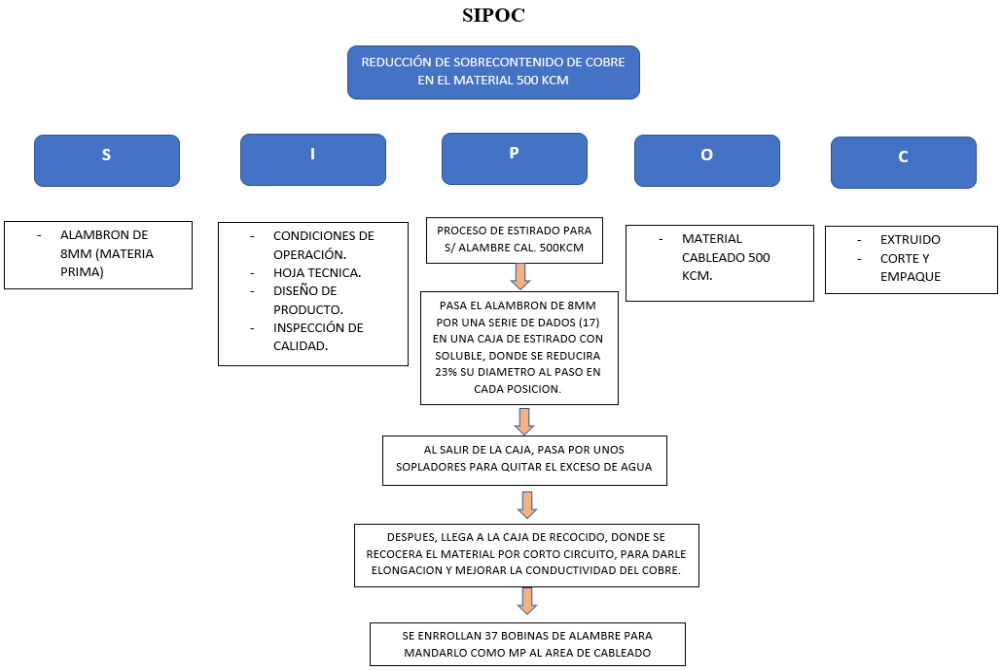
El VSM reveló áreas con alta acumulación de inventario y baja eficiencia, especialmente en el trefilado. La presencia de múltiples actividades sin valor agregado y la falta de estandarización en los parámetros operativos sugieren que existen condiciones propicias para generar sobrecontenido de cobre.

Sin embargo, para entender de manera más estructurada los elementos críticos que interactúan en el proceso como proveedores, entradas, operaciones clave, salidas y clientes, se elaboró un SIPOC. Esta herramienta permite mapear de forma estratégica los componentes del sistema productivo, establecer puntos de control relevantes y facilitar la alineación con las expectativas del cliente final.

1.5.2. Análisis SIPOC

Figura 6

Análisis SIPOC del cable 500 KCM



Nota: Con este mapeo podemos entender que elementos pueden ser necesarios para nuestro análisis. Elaboración propia (2025).

El SIPOC presentado en la Figura 6 permitió representar de manera clara y estructurada el proceso completo de fabricación del conductor 500 KCM, desde el

suministro del alambrón hasta la entrega del producto terminado. Su análisis fue clave para visualizar los puntos críticos donde se genera variación en el diámetro del alambre y, por tanto, posibles excesos en el contenido de cobre.

El proveedor entrega alambrón de 8 mm como materia prima, que es procesado a través de un conjunto de dados de trefilado (P), donde se reduce su diámetro en aproximadamente 23 % por paso, hasta alcanzar el calibre requerido. A lo largo del proceso, intervienen también etapas de eliminación de agua mediante sopladores, recocido por corto circuito y recolección del material en bobinas. Cada una de estas etapas, especialmente la de trefilado y recocido, representa un punto de control crítico por su impacto directo en la variación del diámetro y la longitud del conductor, que a su vez influye en el sobreconsumo de cobre.

Los insumos del proceso (I) como la hoja técnica, los parámetros de operación y las especificaciones de calidad establecen los criterios bajo los cuales debe mantenerse controlada la producción. La salida (O) esperada es un material trefilado de calibre constante, que será utilizado como materia prima en el área de cableado y posteriormente en las etapas de extrusión, corte y empaque (C).

Este SIPOC fue fundamental para orientar la intervención bajo la metodología DMAIC, ya que permitió:

- Identificar los proveedores internos del proceso (como recocido y soplado).
- Reconocer el rol de las especificaciones técnicas como insumos clave para el control de variabilidad.
- Localizar los procesos donde ocurren desviaciones del diámetro objetivo, generando sobrecontenido de cobre.

En conjunto, el SIPOC contribuyó a delimitar los alcances del proyecto, alinear a las áreas involucradas y establecer una visión sistémica de las interacciones que influyen en la calidad dimensional del producto. Su integración favoreció la toma de

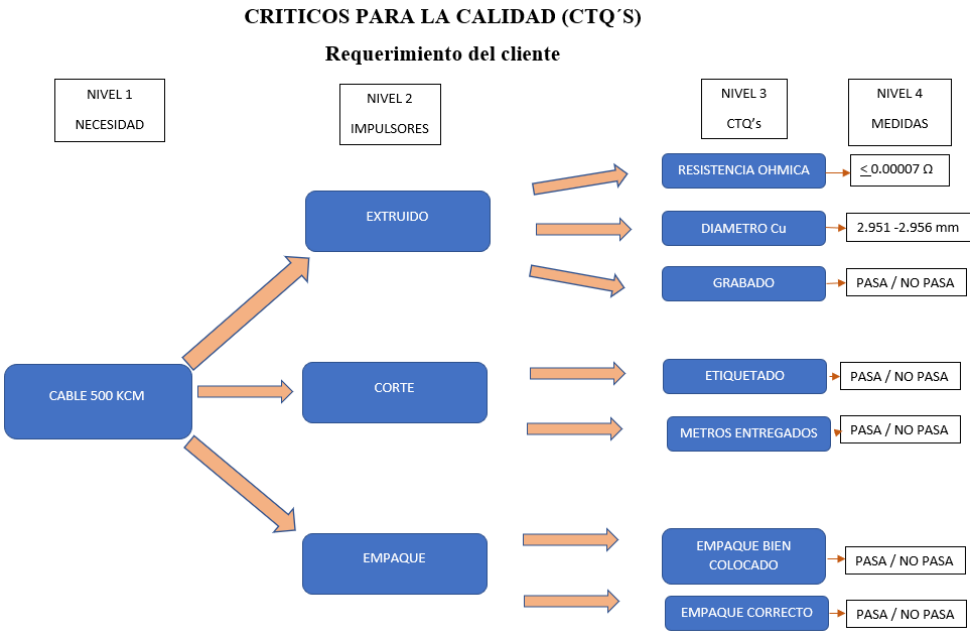
decisiones informadas en el análisis de causa raíz, diseño de experimentos y despliegue del plan de control.

El SIPOC permitió visualizar que las desviaciones en el contenido de cobre están directamente asociadas con entradas mal definidas, controles débiles y procesos críticos como el trefilado y recocido. Para profundizar en la identificación de los aspectos que afectan directamente la calidad desde la perspectiva del cliente, se desarrolló un Árbol de CTQs (Critical to Quality). Esta herramienta ayuda a traducir los requerimientos del cliente en variables críticas del proceso, permitiendo enfocar la mejora en aquellas características que más inciden en la satisfacción y la eficiencia.

1.5.3. Árbol de CTQ´s

Figura 7

Árbol de críticos para la calidad



Nota: Se elabora el árbol de manera que nos apoya a determinar los críticos para cliente y así también determinar el resultado esperado, en este caso puede ser el diámetro, que es una variante para el sobrecontenido. Elaboración propia (2025).

El análisis CTQ (Critical to Quality) presentado en la Figura 7 permitió desglosar de forma jerárquica las necesidades del cliente y traducirlas en características críticas del proceso que deben ser estrictamente controladas para asegurar la calidad del cable 500 KCM. Este desglose es clave para enfocar correctamente la estrategia DMAIC y priorizar los esfuerzos de mejora en función del impacto sobre la satisfacción del cliente y el desempeño del producto.

En el Nivel 1, se establece como necesidad general del cliente la entrega de un cable conforme en todos sus aspectos funcionales y de presentación. En el Nivel 2, se identifican los impulsores clave del proceso: extrusión, corte y empaque. Estos representan las principales operaciones que transforman el producto y donde se concentra el control de calidad.

En el Nivel 3, se detallan los CTQ's específicos asociados a cada etapa:

- Extrusión: control de resistencia óhmica, diámetro del conductor de cobre (Cu) y calidad del grabado.
- Corte: precisión en el etiquetado y longitud entregada.
- Empaque: cumplimiento en el modo de embalaje y correcto posicionamiento.

Finalmente, en el Nivel 4, se definen las métricas y criterios de aceptación para cada CTQ. Es importante destacar que el diámetro del cobre, con rango definido entre 2.951 – 2.956 mm, es el CTQ más directamente vinculado al sobrecontenido de cobre. Su control adecuado tiene un doble propósito: garantizar la funcionalidad eléctrica (asociada a la resistencia óhmica) y minimizar el desperdicio de materia prima (cobre), lo que representa un impacto económico significativo.

Este diagrama permitió:

- Identificar las especificaciones críticas que no pueden ser comprometidas.
- Alinear los parámetros de medición con los objetivos de reducción de sobrecontenido.

- Enfocar el diseño de experimentos (DOE) y los planes de control en los parámetros operativos que afectan directamente a estos CTQ's, particularmente el diámetro Cu.

En resumen, el CTQ diagramado proporcionó una estructura clara para priorizar variables clave del proceso, conectar especificaciones técnicas con necesidades del cliente, y sustentar la lógica de la mejora continua aplicada en el proyecto.

Con base en las variables críticas identificadas (como el diámetro del conductor), se hizo necesario identificar las causas raíz que generan variabilidad y sobrecontenido. Para ello, se construyó un diagrama de Ishikawa, basado en datos del sistema de manufactura y sesiones con operadores, con el objetivo de visualizar causas posibles desde una perspectiva multidimensional.

Dichas reuniones se programan en distintos días del mes con el fin de cubrir todos los turnos productivos, ya que el personal rota continuamente. Esta dinámica permitió recopilar información cualitativa clave para estructurar el análisis de causa raíz.

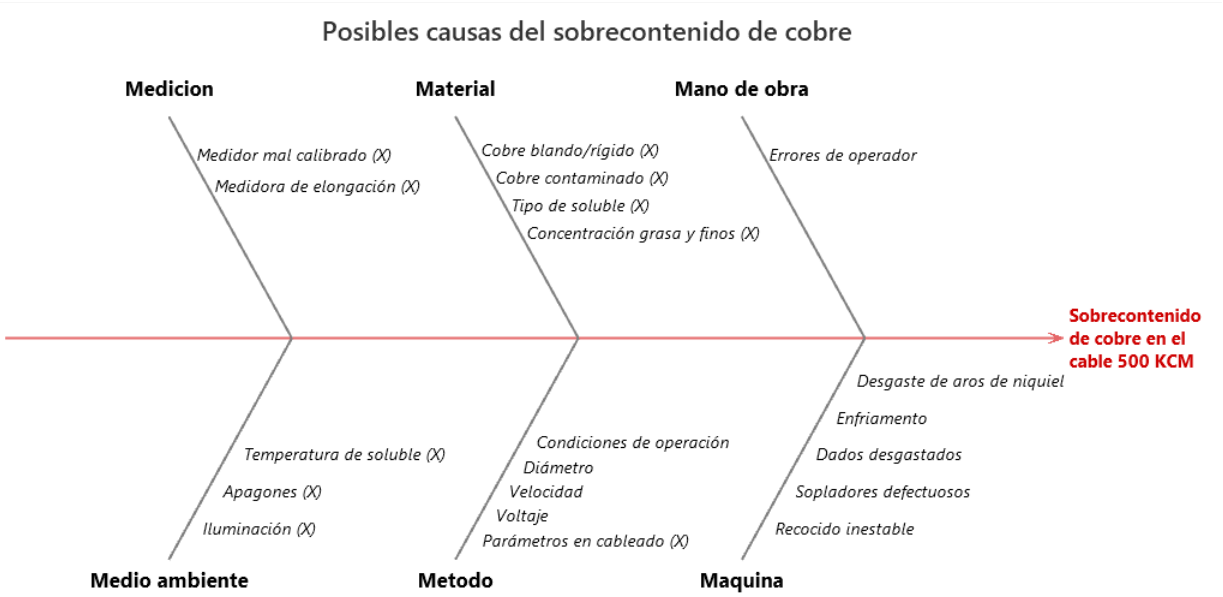
Haciendo uso de estas reuniones, se expuso el tema del sobrecontenido de cobre para el estudio del CABLE 500 KCM en el proceso de estirado, y se recabó información de una lluvia de ideas por parte de los operadores, coincidiendo con algunas propuestas en la fundamentación del proyecto.

Como resultado, tenemos el siguiente diagrama de causa y efecto Ishikawa:

1.5.4. ISHIKAWA

Figura 8

Diagrama causa-efecto para el sobrecontenido del cable 500 KCM.



Nota: Elaboración propia a partir de sesiones de lluvia de ideas con operadores de producción. Elaboración propia (2025).

En la Figura 8 se presenta el diagrama de causa y efecto con las posibles causas del sobrecontenido de cobre. Se identificaron inicialmente múltiples factores agrupados en categorías clásicas (6M). Tras el análisis técnico, documental y en campo, se descartaron las causas marcadas con una “X”, al comprobarse su cumplimiento con especificaciones, certificados de calidad, o porque se encontraban fuera del alcance del estudio. Las causas que permanecen sin marcar fueron consideradas como variables críticas o factores significativos, y fueron evaluadas posteriormente mediante diseño de experimentos y análisis de capacidad del proceso.

El diagrama de Ishikawa desarrollado permitió estructurar y visualizar las posibles causas raíz del sobrecontenido de cobre en el proceso de fabricación del cable 500 KCM, agrupándolas según las 6M tradicionales: Mediciones, Material, Mano de obra (Personal), Métodos, Medio ambiente y Máquinas.

Este análisis cualitativo facilitó una visión integral de los factores que podrían estar generando variabilidad en el diámetro del conductor, y por lo tanto, contribuyendo a que se exceda el contenido nominal de cobre por metro de cable.

Estos hallazgos del diagrama de Ishikawa fueron clave para el diseño del experimento posterior, al identificar presión y voltaje como variables críticas de control.

A continuación, se detallan todas y cada una de las espinas del diagrama de pescado:

Mediciones

- **Equipo de medición calibrado:** se menciona que parte del error en las mediciones es atribuible al equipo mal calibrado; sin embargo, existe un plan de calibración anual, donde se asegura que los equipos de medición estén calibrados ante instituciones acreditadas como la EMA o de ser menor rigurosa Perry Jonhson.
- **Medidora de elongación:** del mismo modo, se realiza el seguimiento correspondiente a los equipos mediante su etiquetado y la emisión de certificados de calibración por parte de instituciones externas y filiales. En consecuencia, se descarta la posibilidad de una calibración inadecuada del equipo.

Figura 9

Informe de calibración de máquina de elongación

CLIENTE: CUSTOMER		INFORME: 120-24 REPORT:
DIRECCIÓN: ADDRESS:		
TELÉFONO DE CONTACTO: TELEPHONE OF CONTACT:	CONTACTO: ALAN SALVADOR MACEDO CONTACT	FECHA DE CALIBRACIÓN: 2024-ABRIL-23 CALIBRATION DATE:
PRÓXIMA FECHA DE CALIBRACIÓN: 2025-ABRIL-23 NEXT CALIBRATION DATE:	FECHA DE RECEPCIÓN: 2024-ABRIL-23 RECEPTION DATE:	FECHA DE EMISIÓN: 2024-ABRIL-29 ISSUE DATE:
DESCRIPCIÓN: MÁQUINA DE ELONGACIÓN DESCRIPTION: ALCANCE: 50% SCOPE: RESOLUCIÓN: 1,0 % RESOLUTION:	CALIBRAO EN: SITIO CALIBRATED IN	MARCA: IT BRAND NAME
MODELO: MW-8 MODEL	No. DE SERIE: 5254 SERIAL No.	IDENTIFICACIÓN: PG-4.2.1 IDENTIFICATION:
PATRÓN: GAGE MASTER:	REGLA METALICA CON VALOR NOMINAL 0.5 mm, MARCA STARRET; NÚMERO DE SERIE: S/N , MODELO: C436 ID: 2003087; INFORME DE CALIBRACION: ICAD-0802-2023 EMITIDO POR METEC S.A DE C.V; INCERTIDUMBRE DE MEDICA: ± 0,17 mm ; FECHA DE CALIBRACION 2023-04-28, VIG 1 AÑO; TRAZABLE AL PATRÓN NACIONAL DE LONGITUD (CENAM)	

Nota: Este es el certificado de calibración del equipo ante EMA, nos dice que el equipo está dentro de parámetros.

Material

- **Cobre blando/rígido:** Se ha identificado que la materia prima puede presentar variaciones en su dureza, manifestándose como cobre más blando o rígido, lo cual constituye una posible fuente de variabilidad en el proceso. Sin embargo, siempre que el proveedor emita un certificado de calidad que acredite el cumplimiento de las especificaciones establecidas, tal como se muestra en la Figura 9, el material debe ser considerado apto para su transformación.
- **Cobre contaminado:** también se descarta al contar con un certificado de calidad de parte del proveedor, se tiene documentación; sin embargo, es de carácter confidencial.
- **Tipo de soluble:** Se identifican solubles tanto en la fosa como en el proceso de recocido del cobre. No obstante, junto con los niveles de concentración de grasa y finos, estos factores se descartan como causas potenciales, dado que se lleva a cabo un monitoreo semanal del soluble en cada máquina para garantizar su control dentro de los límites establecidos, así como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Análisis de soluble

ANALISIS DE SOLUCIONES DE ESTIRADO

(SOLUBLES)

ASEG. DE CALIDAD

F-AC-306 (REV.5)

SISTEMA MAQUINA	GRASA	CONCENTRACION DE GRASA %			ACIDEZ ALCALINIDAD PH			TEMP. ESPECIFICADA °C		TEMPERATURA °C	CONDUCTIVIDAD mS / cm		OBSERVACIONES Comentarios
		MIN	MAX	REAL	MIN	MAX	REAL	MIN	MAX	REAL	MAXIMA	REAL	SOLUBLE TOMADO A LAS 10:45 Hrs
M85[5] - 1 Y 2	SLN-MPS RICHARDS APEX.	1	Información confidencial									8.30	1 MAQUINAS TRABAJANDO

Nota: Documento donde se anotan los análisis del soluble, que por información confidencial no se colocan, pero está dentro de parámetros.

- **Concentración de grasa y finos:** La concentración de grasa, acidez, temperatura y conductividad son las variables clave para este monitoreo y, como se indicó previamente y se muestra en la Figura 10, se controlan y registran semanalmente. Adicionalmente, se utiliza un papel filtro que, si bien no desempeña un papel principal en el proceso, cumple una función complementaria al capturar los finos de cobre. Este filtro se reemplaza al término de su vida útil. En caso de no cumplir eficientemente con su función, se esperaría un incremento en la concentración de cobre en solución, observable a través de la medición de la conductividad.

Mano de obra

- **Errores de operador:** errores de la operación, equivocaciones, naturales del mismo operador.

Medio Ambiente

- **Temperatura de soluble:** se descarta nuevamente con la medición de análisis del soluble como en la Figura 10.
- **Iluminación:** por parte del departamento Seguridad e Higiene y bajo la norma NOM 025-STPS-2008 la iluminación se encuentra en condiciones óptimas, midiéndose con luxómetro y con su documentación correspondiente.
- **Apagones:** los operadores lo mencionan; sin embargo, no influye ya que lo único que ocurre es que genera reventón en el cable y desperdicio operativo.

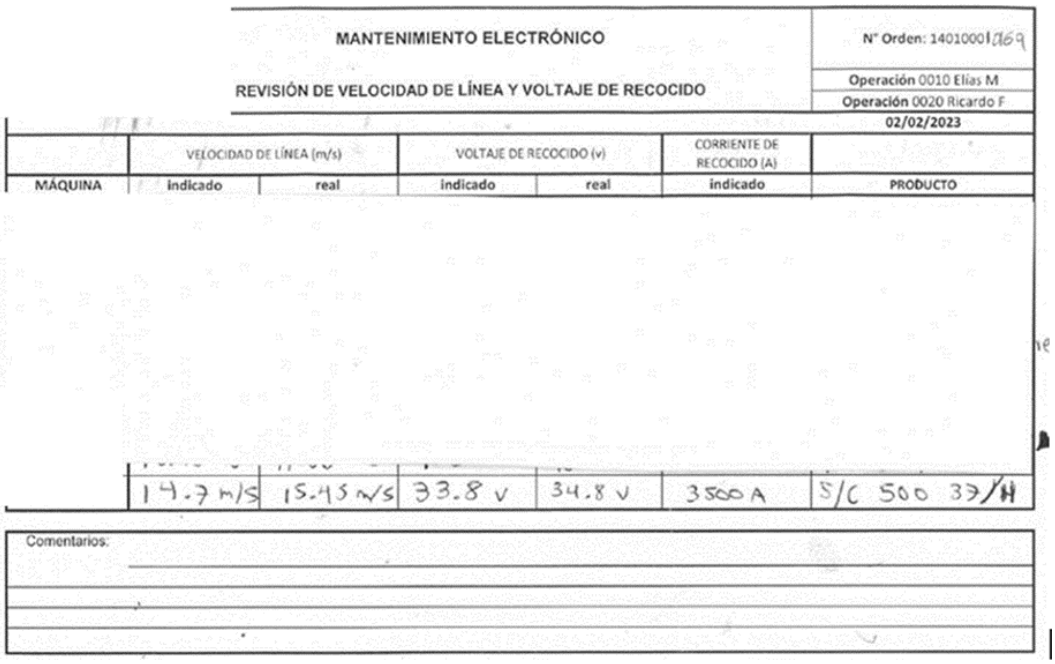
Métodos

- **Parámetros en cableado:** se deben conocer los parámetros de la máquina de cableado; sin embargo, el proyecto abarca hasta el área de estirado, si se desea saber si el sobrecontenido se genera en el área de cableado, se debe concluir primero el estudio en el área de estirado.

- **Voltaje:** justificado en especificaciones técnicas y revisiones por el área electrónica.

Figura 11

Revisión del mantenimiento electrónico para la velocidad y voltaje en máquina



MANTENIMIENTO ELECTRÓNICO

N° Orden: 1401000[illegible]69

REVISIÓN DE VELOCIDAD DE LÍNEA Y VOLTAJE DE RECOCIDO

Operación 0010 Elías M

Operación 0020 Ricardo F

02/02/2023

	VELOCIDAD DE LÍNEA (m/s)		VOLTAJE DE RECOCIDO (v)		CORRIENTE DE RECOCIDO (A)	
MÁQUINA	indicado	real	indicado	real	indicado	PRODUCTO
	14.7 m/s	15.45 m/s	33.8 v	34.8 v	3500 A	S/C 500 37/H

Comentarios:

Nota: Documento donde se anotan las verificaciones de velocidad y voltaje de la máquina, que por información confidencial no se colocan los demás, pero está dentro de parámetros.

- **Velocidad tope:** se trabaja a la velocidad máxima de producción, encontrándola en las especificaciones técnicas y revisiones en el área electrónica como Figura 11, aunque a su vez, esta va de la mano con la presión de la línea.
- **Diámetro:** otro dato también ya revisado previamente en los R&R, ligado a una especificación.

Figura 12

Condiciones de operación del área de estirado

CONDICIONES DE OPERACIÓN
ESTIRADO

DEPARTAMENTO: TÉCNICO
CLAVE: MT-TE-010

CALIBRE AWG Y KCM	BOBINAS DE RECIBO Y LONGITUD DE LLENADO				SELECTOR NUCLEO DE BOBINA			VELOCIDAD PARA CAMBIO DE BOBINA	VELOCIDAD MAXIMA	SELECT-OR VEL.	VOLTAJE PARA EL RECOCIDO ± 2 VOLTS		PRESION DEL DANCER	POSICION PALANCA DE VELOCIDADES		
SUAVE	600 LBS.	1000 LBS.	630 DIN	CESTA	600 LBS	1000 LBS	630 DIN	M / S	M / S	CAMBIO	V	TAP	+/- 1.0 KGS.	1	2	3

Nota: Documento donde se encuentran las condiciones de operación de la máquina, que por información confidencial no se muestra la información, pero se coloca de manera ilustrativa.

- **Condiciones de operación: t**odas las variables previamente mencionadas se encuentran especificadas en el documento, como se observa en la Figura 12, y son las que regulan el comportamiento de las máquinas. A estas se suma la variable de presión, la cual también debe ser considerada dentro del control del proceso.
- **Dados:** El desgaste de los dados es una variable crítica en el proceso de trefilado, dado que estos determinan directamente el diámetro final del cable. En consecuencia, deben ser considerados dentro de las posibles causas de variación. No obstante, se les realiza mantenimiento correctivo y preventivo de forma periódica, aproximadamente cada tres meses, ya sea en función del tiempo de uso o del volumen acumulado de cobre procesado (expresado en toneladas).

Máquinas

- **Poleas en mal estado:** las poleas tienen un tiempo de vida útil; sin embargo, pueden ranurarse, pudiendo ocasionar ralladuras o reventones en el material, sin afectar en el tema del sobrecontenido, bimestralmente se lleva a cabo una revisión, si presentara antes alguna falla se trabaja mediante una orden de trabajo.
- **Aros de níquel (desgaste):** semanalmente se programa una revisión a la máquina que esté disponible, para revisar temas eléctricos, cambio de filtros, cinchos y aros, existe una bitácora también.
- **Sopladores en mal estado:** existen dos tipos de sopladores: internos, que están integrados a los dados, y externos, que son gestionados por el departamento de mantenimiento. Los sopladores internos se reemplazan al cambiar los dados que determinan el diámetro del producto. Aunque se ha mencionado que el mal estado de los sopladores impide un enfriamiento adecuado, es importante aclarar que su función principal es el secado del material posterior al recocido, no su enfriamiento.
- **Enfriamiento:** mencionan que el enfriamiento del material puede afectar; sin embargo, este solo afectaría al apartado de calidad, ya que podemos tener material quemado al no tener buen enfriamiento.
- **Recocido:** el recocido del material puede afectar en la dureza del mismo; sin embargo, se encuentra regido bajo las especificaciones técnicas en el voltaje aplicado, que, en las pruebas realizadas, se mantiene en el margen del voltaje requerido, así como las revisiones de electrónico.

Una vez descrito las 6M de nuestro diagrama de pescado, concluimos que, al utilizar estas herramientas de manera secuencial, se obtiene una comprensión integral del proceso, desde su estructura básica hasta los detalles críticos para la calidad. Esto permite una identificación precisa de las áreas de mejora y la implementación de estrategias efectivas para optimizar el rendimiento.

En el diagrama de causa y efecto, las condiciones de máquina (dados, recocido, sopladores) y las condiciones de operación (voltaje, presión, velocidad) fueron identificadas como causas significativas que varían entre líneas. Esta variabilidad entre líneas justificó realizar un análisis Pareto de estas para determinar su impacto individual sobre el problema central.

El diagrama de Pareto ayudará a visualizar y priorizar los problemas más significativos, permitiendo enfocar los esfuerzos en las áreas que tendrán el mayor impacto en la mejora del proceso.

1.5.6. Análisis Pareto (ABC)

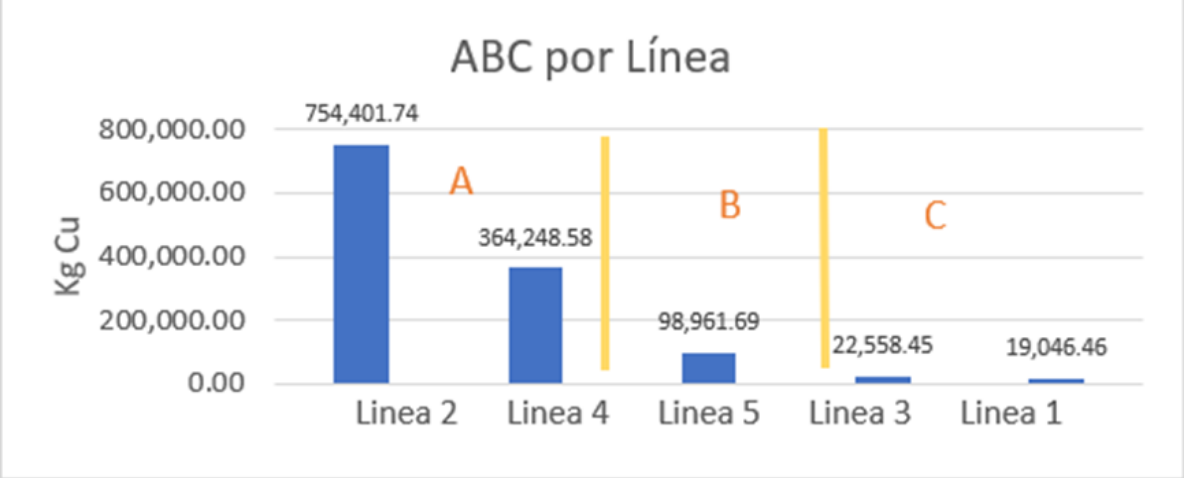
A partir del análisis de causa raíz mediante el diagrama de Ishikawa, se identificaron diversos factores técnicos asociados al sobrecontenido de cobre, estrechamente relacionados con la configuración, el mantenimiento y la operación específica de cada línea de producción. Aunque los equipos comparten un diseño funcional similar, presentan diferencias significativas en cuanto a antigüedad, estado mecánico y frecuencia de intervención. Estas particularidades han sido documentadas tanto en reportes técnicos internos como a través de observaciones directas en campo.

En consecuencia, se optó por realizar un análisis de Pareto utilizando los datos históricos de producción y sobrecontenido por línea, con el fin de cuantificar el impacto relativo de cada línea sobre la variabilidad del diámetro y el desperdicio de cobre. Este enfoque permite priorizar las líneas con mayor desviación, orientando los esfuerzos correctivos durante la etapa de mejora.

En este primer análisis, se revisan las 5 líneas distintas de cable que fabrica la empresa, enumeradas del 1-5 considerando su precio en mercado, siendo 1 el de más alto valor y 5 el de menos valor.

Figura 13

Análisis ABC por la línea de producto

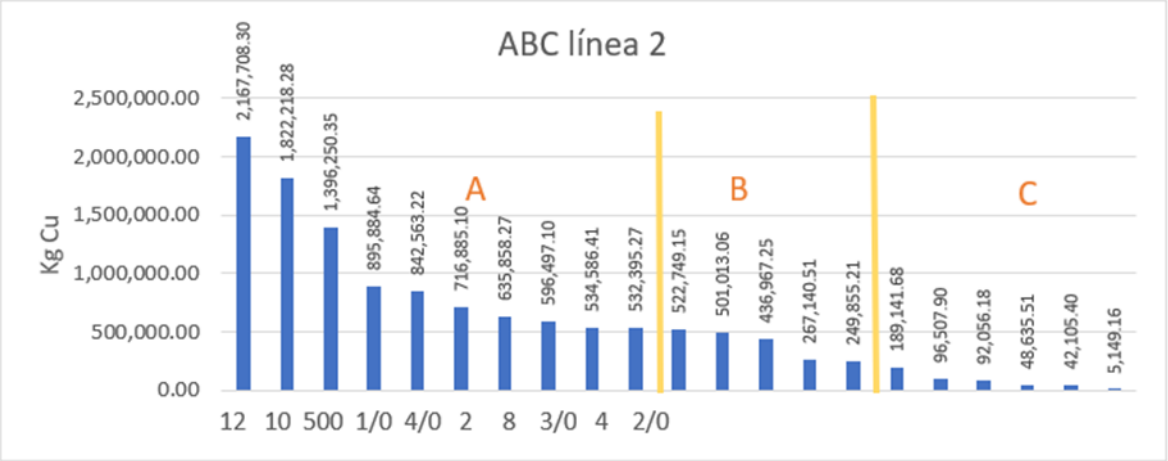


Nota: Se coloca en anonimato las líneas de producto, por temas de confidencialidad, pero este análisis, Nos permite identificar la línea de producto más fabricado en Kg de Cu. Elaboración propia (2025).

En el primer análisis, presentado en la Figura 13 y basado en los kilogramos de cobre producidos entre enero y agosto de 2024, se identificó que la línea 2 fue la más representativa. A partir de este resultado, se procede con un análisis adicional para determinar cuál es el producto más representativo, en términos de Kg/Cu, dentro de dicha línea. Esto permitirá continuar segmentando el estudio hacia un enfoque individualizado, orientado a la intervención específica.

Figura 14

Pareto para Línea 2 de producto



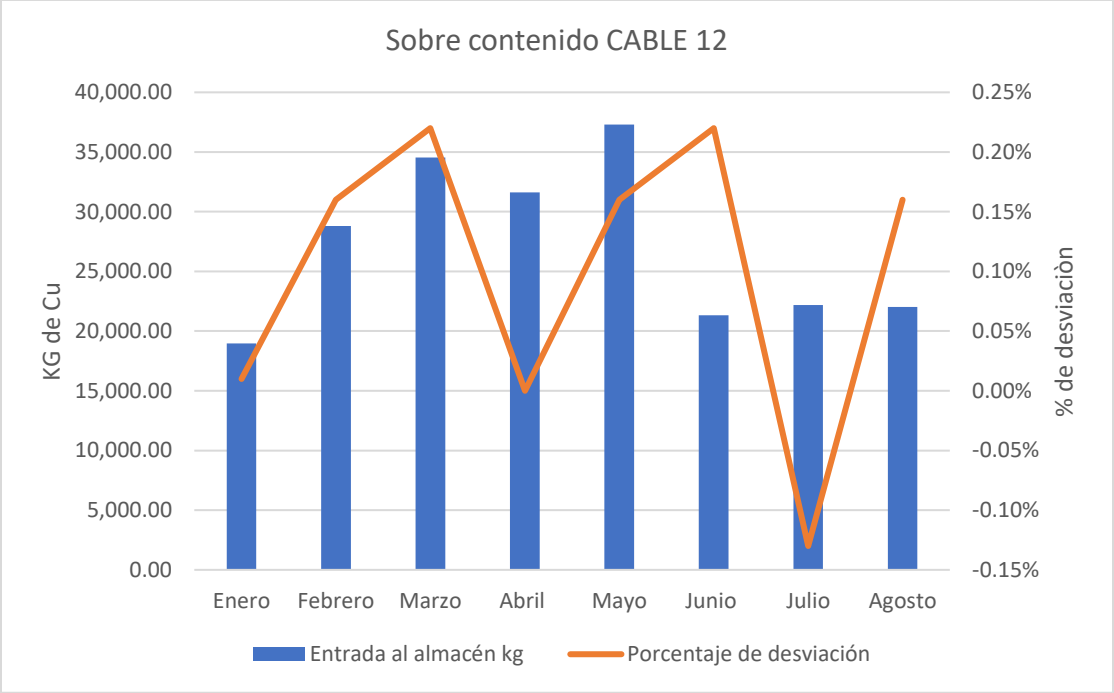
Nota: Este Pareto Nos permite identificar sobre la línea 2 del producto, que calibre es el más relevante y poder aún más robustecer nuestro análisis. Elaboración propia (2025).

En este segundo análisis mostrado en la Figura 14, se presenta exclusivamente la línea 2, que incluye los 21 productos más producidos en kilos de cobre entre enero y agosto de 2024, por temas confidenciales, es omitido todos los calibres, pero se dejan dentro los analizados en “A”, siendo El CABLE 500 KCM el que se encuentra entre los tres más fabricados. Este calibre pertenece a la familia de productos de calibre grueso, caracterizados por su mayor volumen en kilogramos.

A continuación, se detallarán en unos gráficos el comportamiento de su impacto en porcentaje de desviación y la cantidad excedente que se entrega como sobrecontenido, de los 3 primeros más relevantes del Pareto de forma individual, para identificar el de mayor impacto a intervenir.

Figura 15

Gráfico del porcentaje de desviación para el calibre 12

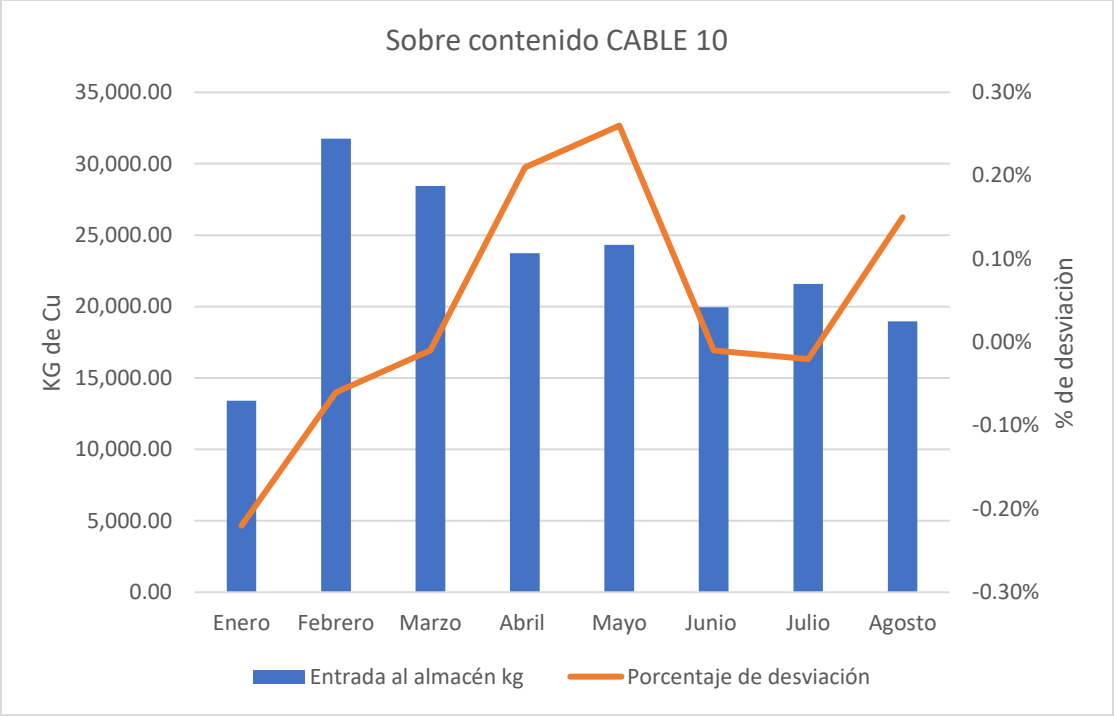


TOTAL	216,769.30	0.10%

Nota: Esta grafica nos muestra la desviación de porcentaje de contenido del Cu en el calibre 12, siendo las barras azules lo fabricado y la línea naranja, cuanto se dio en menor o mayor cantidad. Elaboración propia (2025).

Figura 16

Gráfico del porcentaje de desviación para el calibre 10.

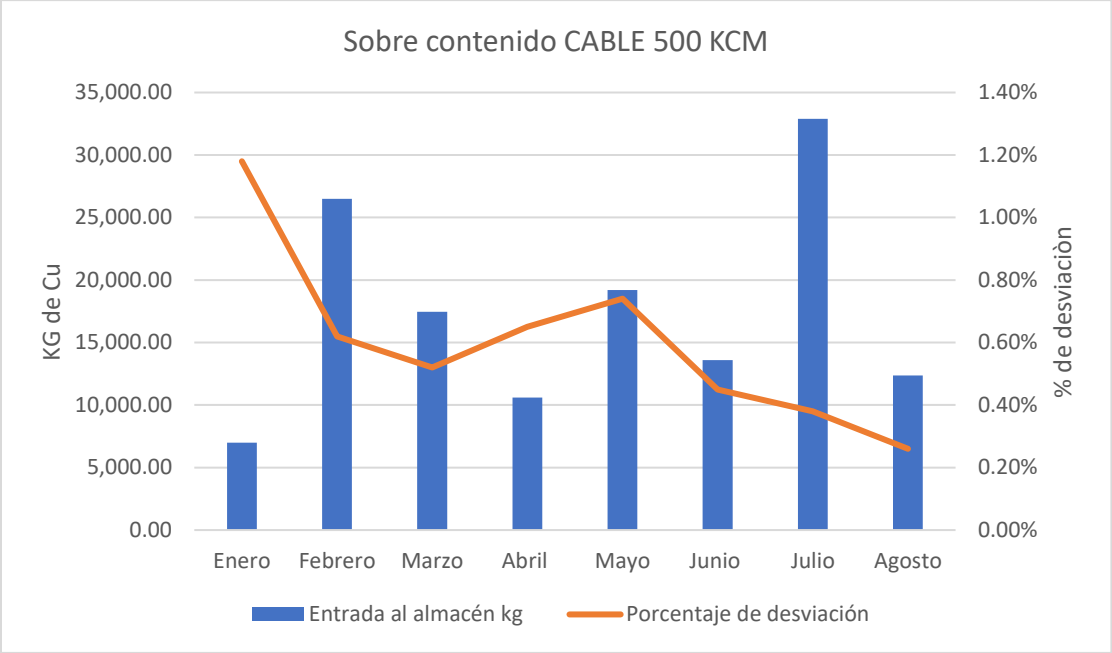


TOTAL	182,223.28	0.04%

Nota: Esta grafica nos muestra la desviación de porcentaje de contenido del Cu en el calibre 10, siendo las barras azules lo fabricado y la línea naranja, cuanto se dio en menor o mayor cantidad. Elaboración propia (2025).

Figura 17

Gráfico del porcentaje de desviación para el calibre 500 KCM.



TOTAL	139,625.35	0.60%

Nota: Esta grafica muestra la desviación del contenido del Cu en el calibre 500, siendo las barras azules lo fabricado y la línea naranja, cuanto se dio en menor o mayor cantidad. Elaboración propia (2025).

Lo presentado en las Figuras 15, 16 y 17 corresponde al resultado individual por calibre. En estos análisis, los productos CABLE 12 y CABLE 10 registran un porcentaje de sobrecontenido de cobre de 0.10% y 0.04%, respectivamente, en contraste con el CABLE 500 KCM, que presenta un valor significativamente mayor, del 0.60%.

Los datos de desviación nos indican la cantidad de cobre fuera de especificación, donde si es mayor a 0%, es la cantidad excedente, si es menor a 0%, es la cantidad a favor.

Con base en el diagnóstico realizado y en los datos obtenidos, se concluye que es necesario implementar un control específico para el sobrecontenido de cobre en el

calibre 500 KCM. Dado que se trata del calibre de mayor grosor entre los analizados, cualquier desviación representa un impacto económico significativamente mayor en comparación con los otros conductores. Por tanto, su control constituye una prioridad estratégica para la reducción de costos y la mejora de eficiencia en el proceso.

Este análisis confirmó que el CABLE 500 KCM representa el mayor impacto económico derivado del sobrecontenido de cobre. Con base en este hallazgo, se consolidó el objetivo principal del proyecto y se procedió a integrar las herramientas aplicadas durante el diagnóstico en una tabla resumen.

A continuación, se presenta la Tabla 1, la cual sintetiza cada herramienta utilizada en este capítulo, destacando su propósito específico y los principales hallazgos, con el fin de facilitar una visualización clara de su función dentro de la estrategia de intervención.

Tabla 1

Herramientas aplicadas en el diagnóstico preliminar y hallazgos principales

Herramienta	Propósito	Hallazgos principales
Diagrama de flujo	Visualizar secuencia del proceso	Identifica trefilado como punto crítico de variación.
VSM (Value Stream Mapping)	Analizar flujo de valor, identificar NVA y VA	El 500 KCM presenta mayor OEE, pero alto sobrecontenido.
SIPOC	Mapear entradas, procesos y salidas clave	Identifica procesos críticos (trefilado, recocido). Relación directa entre entradas y sobrecontenido.
Árbol de CTQs	Traducir requerimientos del cliente a variables críticas	Diámetro del conductor (2.951–2.956 mm) como CTQ principal.
Diagrama de Ishikawa	Identificar causas potenciales del problema	Factores significativos: presión, voltaje de recocido, desgaste de dados.
Análisis Pareto (ABC)	Priorizar productos/líneas con mayor desviación	El cable 500 KCM concentra el mayor sobrecontenido (0.60%).
FODA	Identificar entorno interno y externo	Relevancia operativa del sobrecontenido y oportunidad estratégica.

Nota: Adaptado del análisis desarrollado en las secciones 1.5.1 a 1.5.6. Elaboración propia (2025).

A partir de la información consolidada en la Tabla 1 y las conclusiones derivadas del uso de cada herramienta, es posible definir con mayor claridad los objetivos específicos de esta intervención, alineándolos con las necesidades del proceso y los resultados esperados del proyecto.

1.6 Objetivos de la intervención

A partir del diagnóstico preliminar y del análisis sistémico de la problemática del sobrecontenido de cobre en la fabricación del cable 500 KCM, se establecen los siguientes objetivos para guiar la intervención, asegurando su viabilidad, pertinencia y alineación con los principios de mejora continua y gestión de la calidad.

1.6.1. Objetivo general:

- Reducir el sobrecontenido de cobre en el trefilado del cable 500 KCM hasta alcanzar un valor controlado del 0.13 %, mediante la aplicación estructurada de la metodología DMAIC de Lean Six Sigma, con el fin de optimizar los costos de producción, mejorar la estabilidad del proceso y garantizar el cumplimiento de las especificaciones normativas de calidad.

1.6.2. Objetivos específicos:

- **Definir** el problema con base en el análisis de las variables críticas que inciden en el sobrecontenido de cobre, mediante herramientas como SIPOC, análisis de Pareto y árbol de CTQs, con el fin de establecer un diagnóstico inicial robusto.

- **Medir** las variables críticas mediante estudios de capacidad, estudios R&R del sistema de medición y gráficos de control, para determinar la línea base del desempeño del proceso.

- **Analizar** los factores que generan variabilidad, con el fin de identificar las causas raíz del problema.

- **Mejorar** el proceso mediante el uso de diseño de experimentos y ajustes de parámetros operativos, asegurando la reducción del sobrecontenido de cobre sin afectar la calidad del producto.

- **Controlar** la sostenibilidad de la mejora mediante la estandarización de parámetros y monitoreo continuo.

Cada uno de estos objetivos responde a los criterios esenciales para su ejecución durante la intervención:

- Persona: El personal operativo, de calidad y producción involucrado en el proceso de trefilado.
- Conducta: Acciones medibles como identificar, establecer y evaluar parámetros y resultados.
- Contenido: Optimización del proceso de trefilado del cable 500 KCM con enfoque en la reducción del sobrecontenido de cobre.
- Condición: Condiciones reales de operación dentro de los turnos productivos y con recursos tecnológicos disponibles.

El diseño de estos objetivos permite dar seguimiento puntual y periódico a los avances del proyecto, facilitando su evaluación y asegurando la coherencia entre la hipótesis, el diagnóstico y las acciones que se desarrollarán a lo largo de la intervención. Su correcta formulación asegura la coherencia metodológica y permiten un seguimiento puntual durante toda la intervención.

1.6.3. Análisis FODA

Para complementar el diagnóstico y fortalecer la planificación estratégica de la intervención, se elaboró un análisis FODA que permite visualizar las principales

Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas que inciden en el proceso de trefilado del cable 500 KCM. Esta herramienta, comúnmente utilizada en entornos de mejora continua y gestión de calidad (Huerta, 2020; Khim, 2023), ofrece una visión estructurada de los factores internos y externos que pueden facilitar o dificultar la consecución de los objetivos del proyecto.

La construcción del FODA se realizó con base en los hallazgos del diagnóstico sistémico (SIPOC, Ishikawa, DOE, análisis de capacidad y estudios R&R), y considera como fortalezas los activos tecnológicos y humanos actualmente disponibles; como debilidades, aquellos aspectos internos que aún requieren estandarización; como oportunidades, los elementos del entorno que pueden ser aprovechados para mejorar la eficiencia operativa; y como amenazas, aquellos factores externos que podrían poner en riesgo la sostenibilidad del proceso si no se abordan de forma estratégica.

A continuación, se presenta la matriz FODA con sus respectivas estrategias FO, DO, FA y DA:

Tabla 2

Análisis FODA aplicado al proceso de trefilado del cable 500 KCM.

Fortalezas	**Estrategias FO (Fortaleza + Oportunidad)**
• Control del sobrecontenido con tecnología instalada, como el medidor láser y monitoreo ERP.	• Aprovechar la infraestructura tecnológica para implementar SPC en línea que anticipe desviaciones en el contenido de cobre.
• Personal técnico con experiencia y disposición para la mejora.	• Desarrollar un programa de capacitación continua basado en los hallazgos del DOE, estandarizando prácticas y replicando mejoras en otras líneas.
Oportunidades	**Estrategias DO (Debilidad + Oportunidad)**
• Avance tecnológico en monitoreo de procesos industriales (medidores láser, SPC, DOE).	• Estandarizar el control de parámetros operativos críticos mediante nuevas herramientas estadísticas y validar su aplicación en otros calibres.
• Mayor exigencia de clientes por productos más eficientes y dentro de tolerancias estrictas.	• Actualizar documentación interna y reforzar auditorías para asegurar conformidad con normas ANCE y expectativas de cliente.
Debilidades	**Estrategias FA (Fortaleza + Amenaza)**
• Variabilidad en los resultados entre turnos por falta de estandarización.	• Utilizar el conocimiento técnico del personal y los equipos existentes para documentar, capacitar y asegurar condiciones de operación constantes.
• Procedimientos de medición y operación no actualizados previamente.	• Formalizar nuevas condiciones de operación y métodos de prueba como parte del sistema de gestión y control de calidad.
Amenazas	**Estrategias DA (Debilidad + Amenaza)**
• Incremento sostenido en el precio internacional del cobre, afectando el costo de producción.	• Minimizar el sobrecontenido mediante ajustes operativos sistemáticos, optimizando la materia prima sin comprometer especificaciones.
• Cambios normativos y exigencias de organismos reguladores como ANCE.	• Alinear los procedimientos con las normas NMX-J-010 y NMX-J-012, fortaleciendo el sistema documental y el cumplimiento técnico.
• Avances tecnológicos en la industria que puedan dejar obsoletos los procesos actuales.	• Implementar monitoreo digital, mantener equipos calibrados y fomentar una cultura de mejora basada en datos.

Nota: Elaboración propia (2025) con base en el diagnóstico de capacidades operativas y riesgos externos al proceso productivo.

Este análisis evidencia que la empresa cuenta con una base sólida sobre la cual construir mejoras sostenibles, especialmente mediante el uso de herramientas estadísticas, estandarización de parámetros críticos y desarrollo de capacidades operativas. Asimismo, permite anticipar riesgos relevantes como la variabilidad en el precio del cobre y los cambios en la normatividad técnica, ofreciendo alternativas de respuesta fundamentadas. La integración de este FODA como parte del enfoque DMAIC contribuye a asegurar que las acciones de mejora sean no solo efectivas, sino también alineadas al contexto estratégico y operativo de la organización (Pyzdek & Keller, 2019).

1.7. Relevancia y pertinencia del trabajo

La intervención propuesta resulta de alta relevancia tanto para la organización como para el ámbito profesional y académico, al abordar una problemática crítica que afecta directamente la rentabilidad y eficiencia del proceso productivo. La reducción del sobrecontenido de cobre en la fabricación del cable 500 KCM representa un eje en la rentabilidad optimizando el consumo de materia prima, disminuir costos de producción y fortalecer la competitividad de la empresa en un entorno económico caracterizado por la volatilidad de los precios del cobre y la presión constante por mejorar márgenes operativos (Banco Mundial, 2023).

Además del impacto económico directo, esta intervención genera beneficios tecnológicos al promover la actualización tecnológica en sistemas de medición e implementar técnicas estadísticas avanzadas. También contribuye socialmente al fomentar el uso sostenible del cobre, alineándose con prácticas industriales responsables.

Justificación organizacional

La optimización del contenido de cobre en la fabricación del cable 500 KCM representa una ventaja competitiva para la empresa, al reducir costos sin comprometer la calidad ni el cumplimiento normativo. La implementación de herramientas como Diseño de Experimentos (DOE), análisis de capacidad y gráficos

de control permitirá minimizar la variabilidad del proceso, asegurando mayor estabilidad y predictibilidad operativa.

Además, este proyecto refuerza la cultura organizacional de mejora continua, al involucrar directamente al personal de producción, calidad y mantenimiento en la identificación de causas raíz y optimización del trefilado. Como resultado, la empresa fortalecerá su competitividad mediante un uso más eficiente de la materia prima y la reducción de costos operativos.

Justificación académica y profesional

Este trabajo aplica metodologías avanzadas de Lean Six Sigma y control estadístico de procesos (SPC), integrando herramientas de mejora continua en la resolución de una problemática real del sector manufacturero. La estructura de la intervención se basa en la metodología DMAIC, lo que permite un enfoque sistemático para la identificación, análisis y resolución de causas raíz.

La experiencia derivada de esta intervención fortalece mis competencias en gestión de la calidad, análisis de datos y optimización de procesos, consolidando habilidades esenciales para la toma de decisiones en entornos industriales complejos. Asimismo, este Trabajo de Obtención de Grado contribuye a la formación de profesionales capaces de diseñar e implementar estrategias de mejora con impacto tangible en la rentabilidad y sostenibilidad operativa de las organizaciones.

En términos personales, el proyecto representa una oportunidad para consolidar una intervención con impacto real y medible dentro de una organización, permitiéndome validar mis capacidades como agente de cambio y generador de valor. Además, refuerza mi formación integral como especialista en calidad, brindándome herramientas metodológicas y estratégicas que podré replicar y adaptar en futuros contextos profesionales.

En conclusión, esta intervención no solo genera beneficios operativos y económicos para la empresa, sino que también representa una contribución académica y

profesional en el ámbito de la gestión de la calidad. Para garantizar que los objetivos planteados se cumplan de manera estructurada, en el siguiente capítulo se definirán las estrategias y herramientas metodológicas que permitirán medir y analizar las variables clave del proceso.

Esta delimitación precisa del proceso asegura que el análisis y la intervención se desarrollen de forma sistemática, con resultados específicos, medibles y sostenibles.

Como complemento a esta conclusión, se presenta a continuación la Tabla 3, que muestra los datos de producción mensual en kilogramos, el porcentaje de sobrecontenido y el costo asociado del cobre. Esta información respalda cuantitativamente la magnitud del impacto económico identificado, reforzando la necesidad de la intervención propuesta.

Tabla 3

Pérdida económica por sobrecontenido de cobre.

Mes	Promedio	Total de producción CABLE 500 KCM	Sobrecontenido	Precio Cu	Pérdida
Enero	0.21%	7,001.11	14.63	$249.52	$3,649.98
Febrero	0.28%	26,500.16	73.33	$251.87	$18,469.82
Marzo	0.41%	17,454.63	71.09	$262.88	$18,687.57
Abril	0.31%	10,608.97	32.92	$261.28	$8,601.11
Mayo	0.39%	19,200.05	74.28	$245.73	$18,253.83
Junio	0.26%	13,596.52	35.76	$231.18	$8,266.74
Julio	0.10%	32,891.59	33.49	$208.92	$6,997.62
Agosto	0.11%	12,372.32	13.30	$196.97	$2,618.88
Total	0.26%	139,625.35	348.80		$85,545.55

Nota: Tabla de la pérdida económica por el sobrecontenido, con una pérdida de hasta 86mil pesos mexicanos, datos modificados por confidencialidad. Elaboración propia (2025).

En consecuencia, se establece como objetivo reducir el sobrecontenido de cobre mediante un cálculo razonado, con el fin de generar un beneficio financiero para la organización. Cabe señalar que los costos asociados han sido modificados por motivos de confidencialidad.

A continuación se presenta la Tabla 4, la cual resume la definición del objetivo del proyecto, considerando la línea base histórica, el mejor resultado registrado y el GAP correspondiente. Con base en esta información, se definió una meta alcanzable y sustentada en datos reales, validada en conjunto con la dirección de la empresa. Esta delimitación es clave para orientar las acciones de mejora de forma objetiva y medible.

1.7.1. Definición De Meta

Tabla 4

Definición del objetivo para el proyecto.

1	**Línea base (LB)**	Promedio mensual del porcentaje de Kg de Cu con defecto.	0.25%
2	**Mejor resultado (MR)**	El menor porcentaje mensual de desviación de Kg de Cu registrado.	0.08%
3	**GAP**	Diferencia entre la Línea Base y el Mejor Resultado.	0.17%
4	**Definición de objetivo**	Porcentaje deseable de Kg de Cu con defecto mensual.	0.13%

Nota: La definición de objetivo se estableció de acuerdo con el GAP que se tiene y en concordancia con dirección de la compañía. Elaboración propia (2025).

Con metas establecidas y la parte de definición completa decimos que la problemática que se atenderá es: el sobrecontenido de cobre en el cable 500 KCM, que se mantiene en un promedio de 0.25 %, generando pérdidas mensuales superiores a $10,000 MXN.

CAPÍTULO 2

Marco conceptual de referencia

Todo proyecto de intervención requiere ser sustentado teóricamente para garantizar que el análisis del problema, el diseño de soluciones y la evaluación de resultados estén basados en enfoques metodológicos y conceptuales sólidos. En este sentido, el presente capítulo tiene como finalidad establecer el marco conceptual que orienta la intervención enfocada en la reducción del sobrecontenido de cobre en el cable 500 KCM, dentro del proceso de trefilado.

Este marco conceptual no se limita a definir conceptos aislados, sino que busca articular de manera integral las teorías, enfoques y herramientas más relevantes para la comprensión y atención de la problemática. De esta manera, se construye una base teórica que permite entender las causas del sobreconsumo de cobre desde una perspectiva sistémica, identificar los factores críticos del proceso y seleccionar las metodologías idóneas para intervenir de manera efectiva (Checkland, 2008).

Entre los enfoques que sustentan esta intervención destaca el pensamiento sistémico, fundamental para comprender cómo las distintas áreas y variables del proceso productivo interactúan y generan efectos acumulativos que derivan en problemas como la variabilidad del diámetro del conductor y, por ende, el sobrecontenido de cobre. Adicionalmente, la metodología Lean Six Sigma se incorpora como eje rector del proyecto, al ofrecer una estructura de mejora basada en datos, centrada en la reducción de la variación y el desperdicio, con herramientas específicas para la identificación de causas raíz y la optimización de procesos (George, 2005).

Asimismo, el control estadístico de procesos (SPC) y el Diseño de Experimentos (DOE) aportan los fundamentos necesarios para evaluar y mejorar el desempeño

del proceso de trefilado, permitiendo identificar relaciones causales entre variables críticas y establecer condiciones de operación óptimas (Montgomery, 2020). Estos enfoques complementan y refuerzan la estrategia de intervención, asegurando que las soluciones propuestas sean sostenibles, replicables y generadoras de valor para la organización.

Este capítulo se estructura en tres apartados principales. El primero presenta los conceptos y enfoques teóricos directamente vinculados con la problemática, tales como la mejora continua, la variabilidad del proceso, el desperdicio y la optimización de recursos.

El segundo apartado aborda el análisis de referencia para el cambio, explorando modelos que explican cómo las organizaciones adoptan y gestionan procesos de mejora, así como los factores críticos que influyen en la efectividad y sostenibilidad de las intervenciones.

El tercer apartado se enfoca en el estado del arte, incluyendo la normativa aplicable que sustenta el presente trabajo.

En conjunto, este marco conceptual proporciona la base académica y metodológica que guía el desarrollo del proyecto, permitiendo una comprensión profunda de la problemática y facilitando la toma de decisiones fundamentadas en cada etapa de la intervención.

2.1. Conceptos y enfoques teóricos relacionados

Para sustentar teóricamente la intervención sobre el sobrecontenido de cobre en el proceso de trefilado del cable 500 KCM, se consideran cinco enfoques fundamentales que permiten comprender la problemática desde una perspectiva sistémica, operativa y estadística. Estos enfoques son: el pensamiento sistémico, la filosofía Lean Manufacturing, la metodología Six Sigma a través de DMAIC, el control estadístico de procesos (SPC) y el diseño de experimentos (DOE).

2.1.1. Pensamiento sistémico

El pensamiento sistémico permite comprender el proceso de trefilado como un sistema compuesto por múltiples elementos interdependientes, cuyas interacciones generan efectos acumulativos en la variabilidad del producto. Según Checkland (2008), este enfoque permite identificar relaciones causales no lineales entre variables, facilitando la detección de causas raíz y la toma de decisiones integrales. En el caso específico del sobrecontenido de cobre, factores como el desgaste de dados, el voltaje de recocido y la presión aplicada no deben ser analizados de forma aislada, sino como parte de un sistema interrelacionado que requiere una intervención sistémica y coordinada.

2.1.2. Lean Manufacturing

Desde la perspectiva Lean, el sobrecontenido de cobre representa una forma de desperdicio al implicar el uso innecesario de materia prima que no aporta valor adicional al cliente. Womack y Jones (2003) definen el desperdicio como cualquier recurso utilizado que no transforma el producto en algo valioso para el consumidor. En este sentido, el enfoque Lean busca eliminar esta ineficiencia a través de la estandarización, el control visual, la capacitación del personal y la optimización continua del proceso, alineándose con los principios de Imai (1986) sobre mejora continua o Kaizen.

2.1.3. Metodología Six Sigma y DMAIC

La metodología Six Sigma se enfoca en la reducción de la variabilidad del proceso mediante el análisis estadístico de datos. El enfoque DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) permite estructurar de manera lógica las fases de intervención, garantizando la mejora de procesos con una base metodológica rigurosa (George, 2005). Este enfoque guía la totalidad de la presente intervención, desde la definición del problema de sobrecontenido de cobre hasta el control de resultados, tal como se detalla en los capítulos 4 y 5.

2.1.4. Control Estadístico de Procesos (SPC)

El control estadístico de procesos (SPC) constituye una herramienta fundamental para monitorear la estabilidad y capacidad del proceso de trefilado. A través del uso de gráficos de control, histogramas y análisis de capacidad (Cpk, Ppk), es posible evaluar si el proceso opera dentro de los límites de especificación y detectar variaciones inusuales que puedan originar sobrecontenido de cobre. Según Montgomery (2020), el SPC permite identificar patrones de variabilidad y tomar decisiones basadas en datos estadísticos, lo cual resulta esencial para garantizar la sostenibilidad de las mejoras implementadas y mantener la eficiencia operativa a largo plazo.

2.1.5. Diseño de Experimentos (DOE)

El Diseño de experimentos (DOE) se utiliza para establecer relaciones causales entre variables críticas del proceso y los resultados obtenidos. Esta herramienta, descrita por Montgomery (2020), permite identificar combinaciones óptimas de parámetros operativos, como presión, voltaje de recocido y velocidad de línea, que minimicen la variabilidad del diámetro del conductor, asegurando así una reducción del sobrecontenido de cobre sin afectar la calidad del producto. El diseño de experimentos factorial 2x2 se implementó para evaluar la interacción entre presión y voltaje, dos variables críticas identificadas en el diagnóstico.

Descripción del proceso de trefilado

El proceso de trefilado consiste en la reducción progresiva del diámetro del conductor mediante el paso a través de dados de trefilado. Este procedimiento es fundamental para garantizar las dimensiones finales del cable y su desempeño en aplicaciones eléctricas.

Para lograr una reducción controlada del diámetro, se utilizan máquinas de trefilado de múltiples pasos, equipadas con dados de carburo de tungsteno y sistemas de lubricación.

Los parámetros clave del proceso incluyen:

- Velocidad: Determina la tasa de deformación del material y puede influir en la generación de defectos superficiales.
- Presión: Afecta la uniformidad del diámetro y la resistencia mecánica del conductor.
- Dados de tungsteno: como se ha establecido previamente, cada dado reduce aproximadamente un 23 % del diámetro de entrada del alambre. Por tanto, garantizar su vida útil es fundamental para mantener la estabilidad dimensional del proceso y evitar variaciones en el calibre final.
- Temperatura de operación: Un control deficiente puede alterar la plasticidad del cobre y aumentar la variabilidad dimensional.

La combinación de estos factores impacta directamente la calidad del producto final, influyendo en la variabilidad del diámetro y, por consecuencia, en el sobrecontenido de cobre.

Actualmente, la calidad puede entenderse como el grado en que un producto cumple con los requisitos establecidos, considerando tanto la satisfacción del cliente como la eficiencia operativa (DeFeo, 2017)

Así, este marco conceptual integra los principios teóricos y operativos que sustentan la intervención, enfocándose en la optimización de variables críticas, reducción del sobrecontenido y cumplimiento normativo, mediante una visión sistémica y metodológica que asegure resultados sostenibles y replicables.

Estos conceptos y enfoques teóricos conforman la base fundamental sobre la cual se sustenta la estrategia metodológica del proyecto y facilitan el análisis riguroso y coherente de la problemática detectada.

2.2. Análisis de referencia para el cambio

El análisis integral de la problemática del sobrecontenido de cobre, junto con el marco conceptual y la información recabada de la organización, permite

conceptualizar el campo de intervención desde una perspectiva sistémica. Esto facilita identificar no solo los efectos visibles del problema, como el incremento en los costos de producción, sino también las causas raíz, así como las relaciones que existen entre los distintos elementos del proceso que intervienen en su generación.

Para estructurar de manera lógica y coherente los objetivos, actividades, recursos y resultados del proyecto, se emplea como herramienta de referencia la Matriz de Marco Lógico. Esta metodología permite planificar la intervención a partir de la identificación del problema central y sus causas, organizando las acciones y los indicadores necesarios para evaluar su impacto (CEPAL, 2005).

El análisis de referencia para el cambio mediante la Matriz de Marco Lógico permite definir de forma estructurada los objetivos específicos, indicadores, supuestos clave y estrategias que guiarán el proceso de intervención, asegurando una clara alineación con los resultados esperados (Pyzdek & Keller, 2019).

2.2.1. Matriz de Marco Lógico

La siguiente matriz resume la lógica de intervención adoptada para este proyecto, alineando objetivos, actividades, medios de verificación y supuestos.

Tabla 5

Matriz de Marco Lógico para la intervención sobre el sobrecontenido de cobre.

Matriz de Marco Lógico					
Objetivo General	**Problema Central**	**Causas Principales**	**Actividades**	**Resultados Esperados**	**Impacto**
Reducir el sobrecontenido de cobre en el cable 500 KCM mediante la optimización del proceso de trefilado.	Sobrecontenido de cobre en el proceso de trefilado del cable 500 KCM.	- Desgaste de dados. - Falta de estandarización en parámetros de operación. - Deficiencias en los sistemas de medición y monitoreo.	- Diagnóstico profundo. - Estandarización de parámetros críticos. - Aplicación de DOE. - Validación estadística de resultados.	- Reducción del sobrecontenido de cobre al 0.13%. - Mejora en la capacidad del proceso. - Disminución de costos asociados.	- Incremento en la rentabilidad. - Fortalecimiento de la mejora continua. - Replicabilidad en otros productos.

Nota: Elaboración propia basada en la metodología DMAIC y objetivos específicos del proyecto. Elaboración propia (2025).

La aplicación del Marco Lógico como en la Tabla 5 permite ordenar y medir los cambios generados, asegurando que las acciones tomadas aborden las causas raíz y no solo los efectos superficiales del problema. Además, facilita la toma de decisiones estratégicas y refuerza el compromiso de la organización con resultados sostenibles, tanto en términos económicos como operativos (Serrano, 2006).

2.3. Estado de la cuestión

Este apartado proporciona un panorama amplio y fundamentado del contexto técnico, económico y normativo que rodea al uso eficiente del cobre en la industria de fabricación de cables eléctricos. Se exploran los desafíos clave relacionados con el sobrecontenido de cobre y se presentan metodologías efectivas, innovaciones tecnológicas recientes y marcos regulatorios que subrayan la importancia estratégica de controlar y optimizar este recurso esencial. El objetivo es ofrecer al lector un entendimiento profundo y una visión integral del tema antes de profundizar en los subtemas específicos.

2.3.1 El desafío del uso eficiente del cobre en la industria

En la industria moderna de conductores eléctricos, el cobre es una materia prima estratégica y económicamente significativa. Su costo elevado y volatilidad en el mercado exigen que las empresas adopten prácticas rigurosas de optimización para evitar desperdicios y pérdidas financieras. García-Alvarado et al. (2021) señalan que pequeñas desviaciones en el diámetro durante el trefilado pueden resultar en costos incrementales significativos, lo que enfatiza la importancia de implementar estrategias que minimicen estas variaciones. Además, el uso eficiente del cobre tiene un beneficio adicional al contribuir a la sostenibilidad ambiental, reduciendo así la explotación innecesaria de recursos naturales no renovables (International Copper Association, 2022).

2.3.2 Impacto del sobrecontenido de cobre en procesos industriales

El sobrecontenido de cobre se refiere a la cantidad excedente de este material que se encuentra por encima de los niveles especificados para cumplir con las propiedades técnicas y normativas de los productos eléctricos. Aunque en términos porcentuales puede parecer mínimo, una desviación de hasta 0.5% en el contenido de cobre puede traducirse en grandes pérdidas económicas, especialmente cuando se consideran volúmenes industriales significativos. Esta variación implica no solo un desperdicio directo de la materia prima, sino también un incremento sustancial en los costos operativos totales. En consecuencia, las empresas enfrentan una reducción en su competitividad y rentabilidad, destacando así la importancia crítica de controlar y reducir el sobrecontenido de cobre mediante métodos estadísticos y operativos precisos (Polhemus, 2017).

2.3.3 Metodologías efectivas para la mejora de procesos industriales

La elección de una metodología adecuada puede marcar la diferencia en la optimización efectiva de procesos industriales. DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), derivada del enfoque Lean Six Sigma, se destaca por su estructura precisa y basada en datos, proporcionando un enfoque estadístico y riguroso frente a métodos más generales como el ciclo PDCA. Antony et al. (2020) destacan que DMAIC no solo identifica problemas con precisión, sino que también proporciona un camino claro hacia soluciones sostenibles y medibles, algo crítico en procesos delicados como el trefilado, donde cada micra cuenta económicamente. Adicionalmente, el Control Estadístico de Procesos (SPC) permite una vigilancia constante del rendimiento operativo, asegurando que las mejoras obtenidas perduren en el tiempo (Polhemus, 2017).

2.3.4 Marco regulatorio en la manufactura de cables eléctricos

El sector de fabricación de conductores eléctricos está ampliamente regulado por normativas técnicas, como la ASTM B170 y las normas mexicanas NMX-J-010 y NMX-J-012 emitidas por la ANCE. Aunque estas normas definen límites de especificación generales, dejan espacio para mejoras adicionales. Martínez-Sánchez y López-Guzmán (2019) argumentan que muchas empresas buscan ir más allá de los mínimos regulatorios para optimizar costos y aumentar la eficiencia productiva, estableciendo parámetros internos más estrictos. Esto posiciona a las compañías que adoptan estos estándares avanzados en una ventaja competitiva significativa, especialmente en mercados altamente regulados y competitivos.

2.3.5 Innovación tecnológica en el control del trefilado

La incorporación de tecnologías avanzadas ha revolucionado la manera en que las empresas controlan la calidad en procesos industriales críticos como el trefilado.

Herramientas como los sensores láser ODAC de Zumbach o los sistemas Beta LaserMike representan avances tecnológicos significativos que permiten monitorear y ajustar el proceso en tiempo real, reduciendo considerablemente el riesgo de desviaciones fuera de especificación (Wright, 2010). La combinación de estas herramientas tecnológicas con métodos estadísticos avanzados como gráficos de control y análisis de capacidad (Cpk y Ppk) ha transformado la gestión de calidad en la manufactura, pasando de enfoques reactivos a una gestión predictiva y altamente eficiente.

2.3.6 Beneficios económicos y ambientales de la optimización del cobre

Reducir el sobrecontenido de cobre no es solo una cuestión técnica; es también estratégica y ambientalmente responsable. Investigaciones recientes como las de Zhu y Sarkis (2022) muestran cómo iniciativas efectivas de optimización en la gestión de materiales críticos como el cobre pueden lograr importantes ahorros económicos y contribuir significativamente a la reducción del impacto ambiental. Empresas que adoptan este tipo de iniciativas no solo mejoran sus márgenes operativos, sino que también fortalecen su reputación corporativa al demostrar un compromiso auténtico con la sostenibilidad y la responsabilidad social empresarial.

Estos beneficios se ven reflejados en el presente trabajo mediante la disminución del sobrecontenido del 0.25 % al 0.14 %, lo que representa una reducción directa del consumo de cobre valorizada en $100,000 durante el periodo de prueba.

En definitiva, el estado de la cuestión confirma que existe una sólida justificación académica, técnica y económica para implementar una estrategia basada en DMAIC en la reducción del sobrecontenido de cobre en procesos industriales, específicamente en la manufactura del cable 500 KCM. Los antecedentes presentados destacan no solo la pertinencia del problema, sino también el enorme potencial para generar valor tangible y sostenible a través de intervenciones meticulosamente planificadas y ejecutadas.

CAPÍTULO 3

Diagnóstico profundo: Marco de referencia y estrategia de intervención

La definición clara y documentada de la estrategia de intervención permite alinear las herramientas seleccionadas con los objetivos del proyecto, favoreciendo la trazabilidad y el enfoque metodológico riguroso (Pyzdek & Keller, 2019).

Este capítulo profundiza en la definición técnica de la intervención, estableciendo la estrategia metodológica, las herramientas estadísticas y de calidad seleccionadas, así como el cronograma de aplicación

En el diagnóstico preliminar (Capítulo 1), se identificaron las principales causas potenciales del sobrecontenido de cobre mediante herramientas como SIPOC, CTQ, Ishikawa y Pareto. Sin embargo, para validar estas hipótesis y cuantificar su impacto en el proceso, es necesario un análisis más detallado. Este capítulo desarrolla el diagnóstico profundo, integrando estudios de medición, análisis de capacidad y correlación estadística para determinar con precisión las variables críticas del proceso, sus interrelaciones, tendencias y magnitudes, así como establecer la estrategia de intervención adecuada. Para ello, se emplean herramientas avanzadas de análisis que permiten validar la hipótesis inicial y orientar la toma de decisiones sobre las acciones de mejora.

El diagnóstico profundo se centra en la evaluación cuantitativa y cualitativa de los factores identificados como principales generadores del sobrecontenido, los cuales son:

- **Desgaste de dados de trefilado**, que afecta directamente el diámetro del conductor.
- **Tensión aplicada durante el trefilado**, que influye en la estabilidad del proceso.

- **Voltaje del recocido**, que incide en las propiedades mecánicas del alambre y su comportamiento dimensional.
- **Velocidad de línea**, que afecta la sincronización del proceso y puede inducir variaciones en el producto final.

Para llevar a cabo este diagnóstico, se considera la recopilación de datos históricos del proceso, mediciones en tiempo real mediante la medidora láser y los registros del sistema ERP de la organización, junto con pruebas específicas realizadas por el área de calidad. El análisis de estas variables permitirá conocer la magnitud del sobrecontenido, su comportamiento a lo largo del tiempo y su correlación con las condiciones operativas del proceso.

En términos metodológicos, la estrategia de intervención se sustenta en la aplicación del ciclo **DMAIC** de Six Sigma, a través dque se busca:

- **Definir** claramente el problema y los objetivos del proyecto.
- **Medir** las variables críticas y establecer una Línea Base (LB) del proceso.
- **Analizar** las causas raíz mediante herramientas como el análisis de correlación, gráficos de control y estudios de capacidad.
- **Mejorar** el proceso mediante la implementación de un Diseño de Experimentos (DOE) que permita optimizar los parámetros de trefilado.
- **Controlar** la estabilidad del proceso a través del monitoreo continuo y la actualización de los estándares operativos.

El propósito del diagnóstico profundo es no solo identificar las variables responsables del sobrecontenido, sino también caracterizar su impacto y determinar los ajustes necesarios para garantizar una reducción sostenible del mismo. Esto permitirá validar la eficacia de la intervención mediante indicadores cuantificables antes y después de su aplicación, como el porcentaje de sobrecontenido, el costo asociado al consumo de cobre y los niveles de capacidad del proceso (**Cpk, Ppk**).

De esta manera, este capítulo establece los fundamentos técnicos y metodológicos para la intervención, asegurando que las acciones propuestas se basen en evidencia objetiva y estén orientadas a atacar las causas raíz del problema, garantizando un cambio real y duradero dentro del proceso productivo.

3.1. Definición de la estrategia de intervención, selección de las herramientas requeridas y el cronograma del diagnóstico profundo

Para identificar las causas raíz del sobrecontenido de cobre en el cable 500 KCM, se aplicaron herramientas de análisis estructurado. Los principales hallazgos obtenidos con cada herramienta son los siguientes:

Diagrama SIPOC: Se identificó que el proceso de trefilado es el punto crítico donde ocurre el sobrecontenido de cobre, particularmente en la etapa de reducción de diámetro.

Diagrama de Ishikawa: Se agruparon las posibles causas raíz en cinco categorías: Máquina, Material, Método, Medio Ambiente y Mano de Obra. Las más relevantes fueron desgaste de dados (Máquina), variabilidad en tensión aplicada (Método) y falta de monitoreo de parámetros críticos (Medio Ambiente).

Basado en estos hallazgos, la estrategia de intervención se centrará en medir, analizar y optimizar estos dos factores (tensión y voltaje) críticos para reducir el sobrecontenido de cobre sin afectar la calidad del producto.

Estrategia de intervención

La estrategia de intervención contempla la aplicación de herramientas específicas en cada etapa del ciclo DMAIC, con el propósito de estructurar un diagnóstico profundo y facilitar la implementación efectiva de las mejoras. El objetivo central es lograr una reducción cuantificable del sobrecontenido de cobre, optimizando el consumo de materia prima sin comprometer la calidad del producto ni el cumplimiento de los requisitos normativos.

El análisis estructurado del diagnóstico profundo siguió una secuencia metodológica lógica: primero se utilizó SIPOC para comprender el proceso global, posteriormente un Diagrama de Ishikawa para identificar posibles causas raíz, seguido del Análisis Pareto para priorizar estas causas, culminando con un Diseño de Experimentos (DOE) para optimizar los parámetros operativos críticos.

A continuación, en la Tabla 6 se presenta la selección de herramientas para cada fase del proyecto:

Tabla 6

Herramientas para cada fase DMAIC

Fase DMAIC	Herramientas Seleccionadas	Propósito	Variables Analizadas
Definir	SIPOC, Diagrama de Ishikawa, Árbol CTQ.	Identificar el flujo del proceso, actores clave y posibles causas del sobrecontenido.	- Parámetros operativos actuales. - Revisión de estándares de calidad.
Medir	Estudios R&R, Análisis de capacidad (Cpk, Ppk), Histogramas, Medidora láser, AMEF.	Cuantificar la variabilidad del proceso y validar la fiabilidad de los sistemas de medición (AIAG, 2010).	- Variabilidad del diámetro. - Precisión de instrumentos de medición.
Analizar	Análisis de correlación, DOE preliminar, Pruebas de hipótesis.	Determinar la relación entre las variables críticas y el sobrecontenido de cobre.	- Desgaste de dados. - Tensión aplicada. - Voltaje de recocido. - Velocidad de línea.
Mejorar	Diseño de Experimentos (DOE), Plan de estandarización.	Optimizar los parámetros del trefilado para reducir el sobrecontenido.	- Parámetros óptimos del proceso. - Validación de mejoras mediante pruebas piloto.
Controlar	Gráficos de control, Documentación de estándares, Plan de monitoreo.	Asegurar que las mejoras implementadas se mantengan y sean sostenibles (Juran, 2001).	- Variabilidad después de la intervención. - Cumplimiento de especificaciones normativas.

Nota: Se incluyen las herramientas utilizadas para cada etapa de la metodología, el propósito y que variables se analizaron.

Elaboración propia (2025).

Cronograma del diagnóstico profundo

Con el propósito de asegurar una ejecución ordenada tanto del diagnóstico como de la intervención, se estableció un cronograma de actividades que abarca de enero de 2024 a enero de 2025. Este se presenta en la Figura 18, donde se detallan las fases, acciones clave y periodos estimados para el desarrollo del proyecto.

Figura 18

Diagrama de GANTT

| DIAGRAMA DE ACTIVIDADES (GANTT) | | |

3.1.1 Análisis de Sistemas de Medición

Antes de aplicar herramientas estadísticas al proceso, es fundamental validar la confiabilidad de los datos mediante la evaluación de la repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición (Montgomery, 2020).

Como primer paso, se llevará a cabo una revisión integral de los procedimientos y del flujo operativo relacionados con la toma de datos. A continuación, se describen las etapas a seguir, así como las acciones previstas para su correcta ejecución. Entre ellas destaca la toma de datos de las pruebas realizadas en el laboratorio de calidad, donde se aplicará un estudio específico de análisis del sistema de medición (MSA).

Previamente, es necesario identificar y evaluar los recursos requeridos para estas actividades, los cuales se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7

Recursos utilizados para la etapa de medición

	Recurso Humano	**Recurso tecnológico**
Departamento de Calidad	➢ Inspectores o laboratoristas.	➢ Medidora Beta Láser Mike. ➢ Herramientas de medición.
Departamento Técnico	➢ Tecnólogos.	➢ ERP's Advaris y SAP. ➢ Minitab.
Departamento de Manufactura	➢ Personal de Producción.	➢ Máquinas de trefilado.

Nota: Estos fueron los recursos proporcionados por la compañía para llevar a cabo esta labor. Elaboración propia (2025).

Como se observa en la Tabla 7, los laboratoristas participan de forma clave al capturar los datos de los lotes de inspección, mientras que los operadores de producción contribuyen con su conocimiento práctico del proceso. Por su parte, los tecnólogos tienen la facultad de realizar ajustes cuando es necesario, apoyando con su experiencia técnica y operativa.

Una vez identificados los recursos involucrados se procederá a revisar el esquema de muestreo actualmente implementado para el estudio de Análisis de Sistemas de Medición (MSA).

Muestreo para Sobrecontenido

Para el control del sobrecontenido de cobre, se realiza un muestreo por cada bobina en el área de producto terminado, cortando una sección de 10 cm. En promedio, se cablean 31 bobinas mensuales, de las cuales se seleccionan aproximadamente 10 muestras, lo que cumple con los criterios establecidos en las tablas de muestreo MIL-STD-414 para inspección por variables.

La Figura 19 y Figura 20 presentan el extracto de la tabla MIL-STD-414 utilizada como referencia para determinar el tamaño adecuado de muestra.

Figura 19

Tabla MIL STD para la toma de muestras

Tabla 11-3 Tabla maestra para inspecciones normal y estricta para planes que se basan en una variabilidad desconocida (método de la desviación estándar) (límite de especificación doble y Forma 2: límite de especificación simple) (Tabla B.3, MIL STD 414)

Letra código de tamaño muestral	Tamaño muestral	Niveles de calidad aceptables (inspección normal)													
		.04	.065	.10	.15	.25	.40	.65	1.00	1.50	2.50	4.00	6.50	10.00	15.00
		M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
B	3								▼	▼	7.59	18.86	26.94	33.69	40.47
C	4							▼	1.53	5.50	10.92	16.45	22.86	29.45	36.90
D	5					▼	▼	1.33	3.32	5.83	9.80	14.39	20.19	26.56	33.99
E	7				▼	0.422	1.06	2.14	3.55	5.35	8.40	12.20	17.35	23.29	30.50
F	10	▼	▼	▼	0.349	0.716	1.30	2.17	3.26	4.77	7.29	10.54	15.17	20.74	27.57
G	15	0.099	0.186	0.312	0.503	0.818	1.31	2.11	3.05	4.31	6.56	9.46	13.71	18.94	25.61
H	20	0.135	0.228	0.365	0.544	0.846	1.29	2.05	2.95	4.09	6.17	8.92	12.99	18.03	24.53
I	25	0.155	0.250	0.380	0.551	0.877	1.29	2.00	2.86	3.97	5.97	8.63	12.57	17.51	23.97
J	30	0.179	0.280	0.413	0.581	0.879	1.29	1.98	2.83	3.91	5.86	8.47	12.36	17.24	23.58
K	35	0.170	0.264	0.388	0.535	0.847	1.23	1.87	2.68	3.70	5.57	8.10	11.87	16.65	22.91
L	40	0.179	0.275	0.401	0.566	0.873	1.26	1.88	2.71	3.72	5.58	8.09	11.85	16.61	22.86
M	50	0.163	0.250	0.363	0.503	0.789	1.17	1.71	2.49	3.45	5.20	7.61	11.23	15.87	22.00
N	75	0.147	0.228	0.330	0.467	0.720	1.07	1.60	2.29	3.20	4.87	7.15	10.63	15.13	21.11
O	100	0.145	0.220	0.317	0.447	0.689	1.02	1.53	2.20	3.07	4.69	6.91	10.32	14.75	20.66
P	150	0.134	0.203	0.293	0.413	0.638	0.949	1.43	2.05	2.89	4.43	6.57	9.88	14.20	20.02
Q	200	0.135	0.204	0.294	0.414	0.637	0.945	1.42	2.04	2.87	4.40	6.53	9.81	14.12	19.92
		.065	.10	.15	.25	.40	.65	1.00	1.50	2.50	4.00	6.50	10.00	15.00	
		Niveles de calidad aceptables (inspección estricta)													

Todos los valores del NCA y de la tabla se dan en porcentaje de defectuosos.
Aplique el primer plan de muestreo ubicado abajo de la flecha; es decir, el tamaño muestral y el valor de k. Cuando el tamaño muestral es igual a, o excede el tamaño del lote, hay que inspeccionar cada artículo del lote.

Nota: Muestreo de aceptación de acuerdo con valores de la compañía, Military Standard 414 (MIL-STD-414). Sampling Procedures and Tables for Inspection by Variables for Percent Defective. Department of Defense, 1957.

Figura 20

Tabla MIL STD para el tamaño de lote

Tabla 11-1 (Tabla A.2. MIL STD 414) Letras código de tamaño muestral*

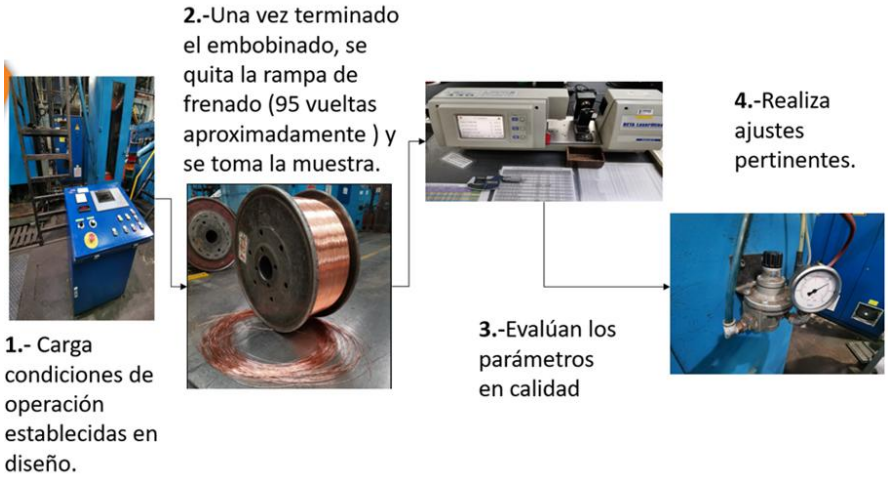
Tamaño del lote	Niveles de inspección Niveles de inspección				
	I	II	III	IV	V
3 a 8	B	B	B	B	C
9 a 15	B	B	B	B	D
16 a 25	B	B	B	C	E
26 a 40	B	B	B	D	F
41 a 65	B	B	C	E	G
66 a 110	B	B	D	F	H
111 a 180	B	C	E	G	I
181 a 300	B	D	F	H	J
301 a 500	C	E	G	I	K

Nota: Tamaño del lote de acuerdo con valores de la compañía, Military Standard 414 (MIL-STD-414). Sampling Procedures and Tables for Inspection by Variables for Percent Defective. Department of Defense, 1957.

Con base a este método de muestreo, se definió el método de inspección actual del área de estirado.

Figura 21

Proceso actual del método de inspección del área de estirado



Nota: Este proceso se realizó para la comprensión del sistema de medición, estando en el área productiva directamente y revisarlo. Elaboración propia (2025).

Una vez entendido el proceso, método y obtención de datos, se lleva a cabo el recabado de datos para sus respectivos análisis donde, con estos datos, podremos iniciar con nuestro R&R para verificar nuestro sistema de medición con base a los siguientes criterios de calificación:

- R&R total del sistema de medición: La suma de los componentes de la varianza Repetibilidad y Reproducibilidad.
- Repetibilidad: La variabilidad en las mediciones cuando el mismo operador mide la misma parte múltiples veces.
- Reproducibilidad: La variabilidad en las mediciones cuando diferentes operadores miden la misma parte.
- Entre las partes: La variabilidad en las mediciones causada por las diferencias entre las partes.

Según las recomendaciones del manual del grupo AIAG, si la variación del sistema de medición es inferior a 10% de la variación del proceso, entonces es aceptable. Para evaluar la variación del proceso, compare la contribución del R&R total del sistema de medición en la columna %Var. del estudio (%Tolerancia, %Proceso) indicada en la salida con los valores de la Tabla (AIAG, 2010).

Figura 22

Porcentaje de aceptabilidad para estudio R&R en variación

Porcentaje de variación del proceso	Aceptabilidad
Menos de 10%	El sistema de medición es aceptable.
Entre 10% y 30%	El sistema de medición es aceptable dependiendo de la aplicación, el costo del dispositivo de medición, el costo de la reparación u otros factores.
Más de 30%	El sistema de medición no es aceptable y debe ser mejorado.

Nota: se toma la fuente de MiniTab, ya que es nuestro software soporte y el usado en el proyecto, Minitab. (2017). Minitab Statistical Software, Version 17. State College, PA: Minitab.

Componentes de la variación

El gráfico de componentes de la variación, generado por el software Minitab, permite visualizar la proporción de variabilidad atribuida a cada fuente de error del sistema de medición. Cuando se ingresa un valor de tolerancia, Minitab muestra barras correspondientes al porcentaje respecto a dicha tolerancia; de manera similar, si se proporciona una desviación estándar histórica, se grafican los porcentajes con relación al proceso (Minitab, 2024).

En este análisis, se identifica que la mayor parte de la variabilidad proviene de las diferencias entre las piezas, siendo esta superior a la repetibilidad y reproducibilidad. Sin embargo, el porcentaje total de variación del estudio R&R supera el 10 %, lo que podría indicar que el sistema de medición no es aceptable para su uso en control de calidad (Minitab, 2024)..

Figura 23

Porcentaje de aceptabilidad para estudio R&R en varianza

Porcentaje de los componentes de la varianza	Aceptabilidad
Menos de 1%	El sistema de medición es aceptable.
Entre 1% y 9%	El sistema de medición es aceptable dependiendo de la aplicación, el costo del dispositivo de medición, el costo de la reparación u otros factores.
Más de 9%	El sistema de medición no es aceptable y debe ser mejorado.

Nota: se toma la fuente de MiniTab, ya que es nuestro software soporte y el usado en el proyecto, Minitab. (2017). Minitab Statistical Software, Version 17. State College, PA: Minitab.

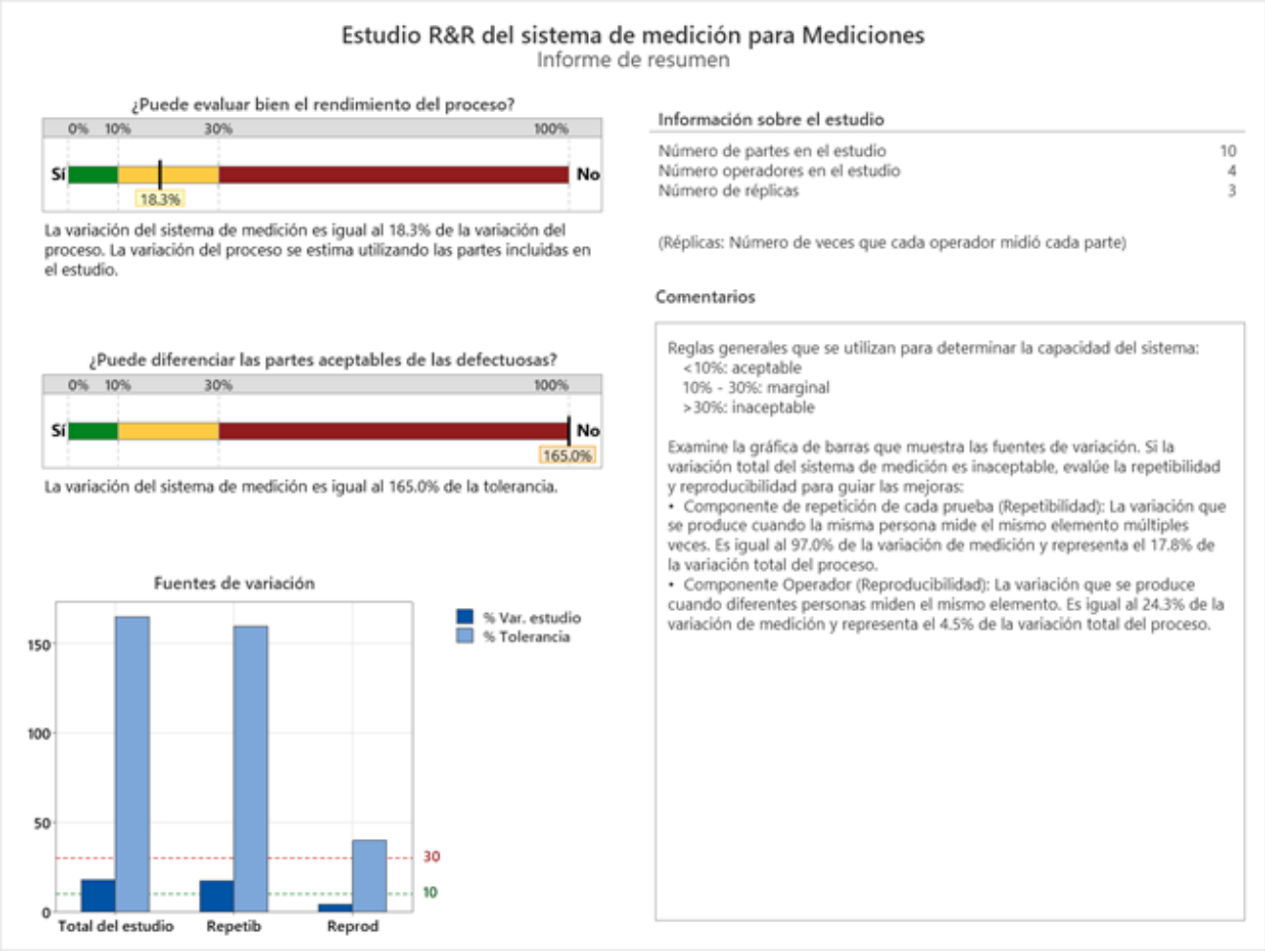
3.1.2. Estudio R&R

El presente estudio se desarrolló conforme a las recomendaciones establecidas por el AIAG en el manual de MSA (AIAG, 2010).

La información presentada a continuación es un R&R aplicado a los 4 inspectores del laboratorio de calidad, para con ello conocer el sistema de medición actual para los datos, donde podemos observar los siguientes resultados en las Figuras 24 y 25.

Figura 24

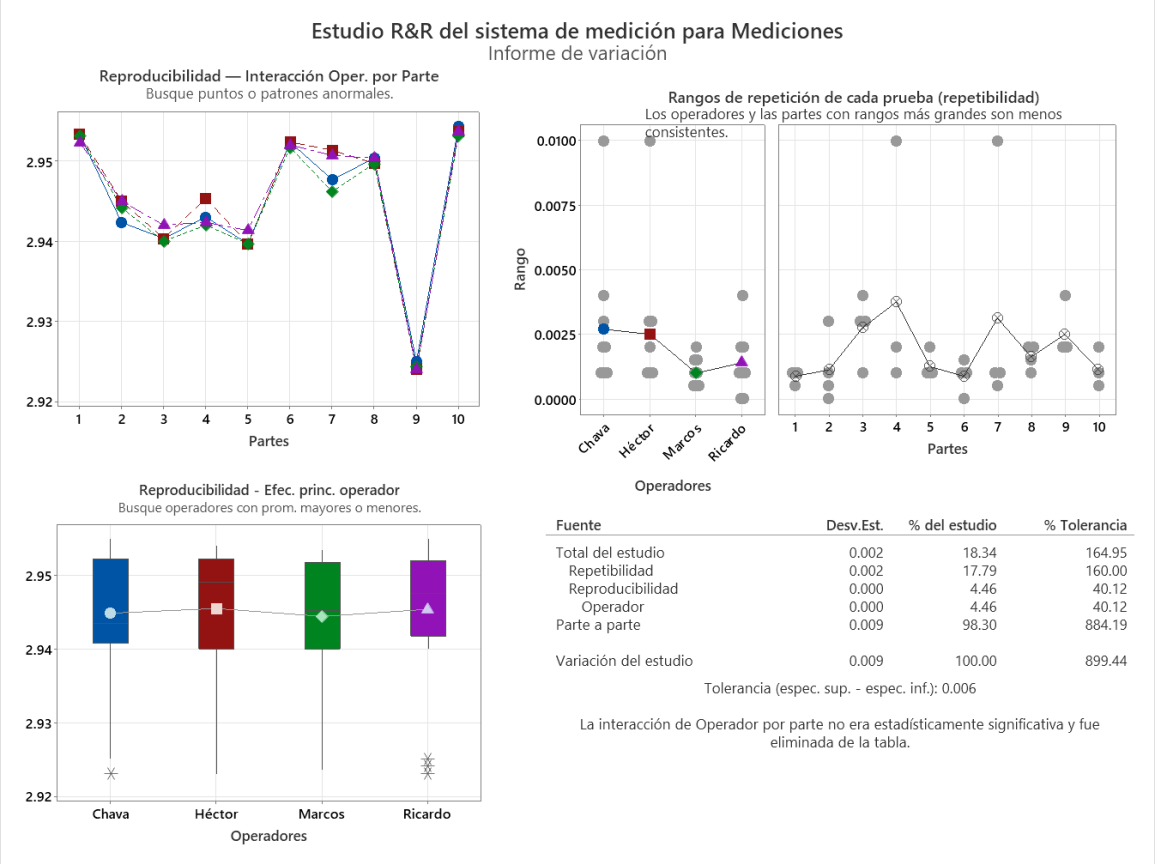
Estudio R&R 1.0



Nota: Primera imagen del análisis en MiniTab obtenida.

Figura 25

Estudio R&R 1.1



Nota: Segunda imagen del análisis en MiniTab obtenida.

Debido a la estrecha tolerancia especificada para la aceptación del material, se identificó que el equipo de medición actual no cuenta con la sensibilidad suficiente para detectar adecuadamente dichas variaciones, ya que el porcentaje de variación del estudio R&R resultó elevado.

Por otro lado, se observó una variabilidad significativa en la categoría *part to part*, lo cual puede considerarse normal dadas las condiciones del muestreo; sin embargo, el valor obtenido fue excesivamente alto, lo que llevó a descartar los resultados del estudio inicial.

Durante el análisis se identificó como área de oportunidad que el laboratorista Marcos mostró el mejor desempeño en las mediciones. Por ello, se recomienda estandarizar el procedimiento replicando sus prácticas operativas, capacitando al resto del personal involucrado para adoptar dicha metodología.

Con base en los resultados del primer estudio R&R, se informó al jefe de Calidad sobre un hallazgo relevante: el método de prueba para determinar el diámetro del alambre permitía interpretación subjetiva por parte del inspector. En particular, se detectó que algunos operadores omitían un paso crítico del procedimiento, lo cual afectaba la consistencia de las mediciones.

- La toma de muestra del diámetro de la sección debe hacerse por ambos extremos y no sólo por uno.

Figura 26

Método de prueba para los diámetros

4.- DESARROLLO DE LA PRUEBA:

4.1 Presionar la parte superior de la pantalla del láser Mike y seleccionar de la biblioteca el tipo de calibre que se va a probar (sección o alambre).

4.2 Seleccionar la abertura de la muesca de acuerdo al calibre de la muestra teniendo en cuenta que la posición 40 es para calibres delgados y la 125 es para calibres gruesos.

4.3 Colocar la muestra en el sujetador giratorio del láser Mike.

4.4 Presionar el botón "CLEAR".

4.5 Posteriormente presionar el botón "GO".

4.6 Esperar a que el valor promedio aparezca en al pantalla y registrarlo.

INFORMACION CONTROLADA NO COPIAR

4.7 En caso de que exista alguna duda retirar la muestra y colocarla por el otro extremo y repetir el mismo procedimiento.

Nota: Imagen del antes, obtenida del método de prueba de la compañía, solo mostrando la parte esencial, ya que, por temas de confidencialidad, no se incluye mas parte del documento.

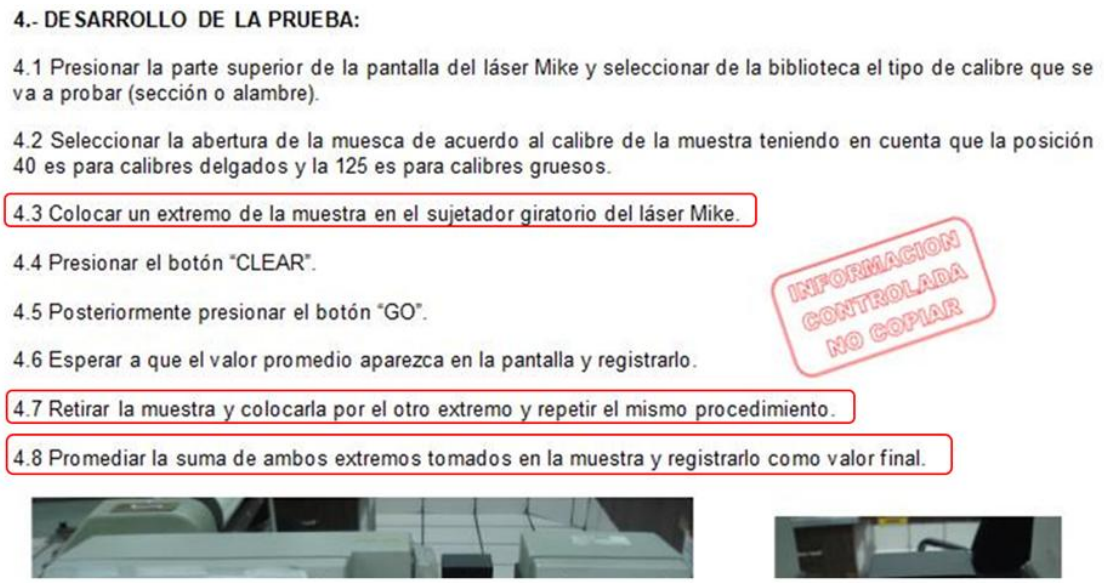
Como primer resultado, si bien modesto en cuanto a su impacto cuantitativo, resultó significativo desde una perspectiva metodológica y operativa. Se procedió a la

modificación del método de prueba utilizado para la medición del diámetro del alambre, con el objetivo de hacerlo más conciso y eliminar ambigüedades que permitieran interpretaciones subjetivas por parte del personal.

El método actualizado quedó establecido de la siguiente manera:

Figura 27

Método de prueba para los diámetros, modificado



Nota: Imagen del después, obtenida del método de prueba de la compañía, solo mostrando la parte esencial, ya que, por temas de confidencialidad, no se incluye mas parte del documento.

En la Figura 27 se muestra la versión modificada del método de prueba utilizado para la medición de diámetros, donde se ha extraído únicamente la sección esencial del documento, omitiendo el resto del contenido por motivos de confidencialidad.

En esta actualización, se editaron los siguientes apartados del procedimiento: el punto 4.3, en el que ahora se especifica que debe colocarse un extremo del alambre para realizar la primera medición; el punto 4.7, que indica la necesidad de tomar una segunda medición desde el extremo opuesto; y el nuevo punto 4.8, en el cual se establece que ambos valores deben sumarse y promediarse para registrar el resultado final de la muestra.

Posteriormente, se llevó a cabo una capacitación dirigida a los inspectores del área para socializar los resultados del análisis previo y formalizar la adopción del nuevo procedimiento. La respuesta del personal fue positiva, mostrando disposición a seguir el nuevo método y mejorar la precisión de sus mediciones.

La Figura 28 ilustra gráficamente la forma en que un inspector ejecuta la medición bajo las nuevas directrices establecidas, utilizando los puntos definidos en el método actualizado. Esta evidencia visual complementa la estandarización del procedimiento, asegurando una correcta interpretación de las instrucciones por parte del personal operativo.

Figura 28

La manera de medir del inspector

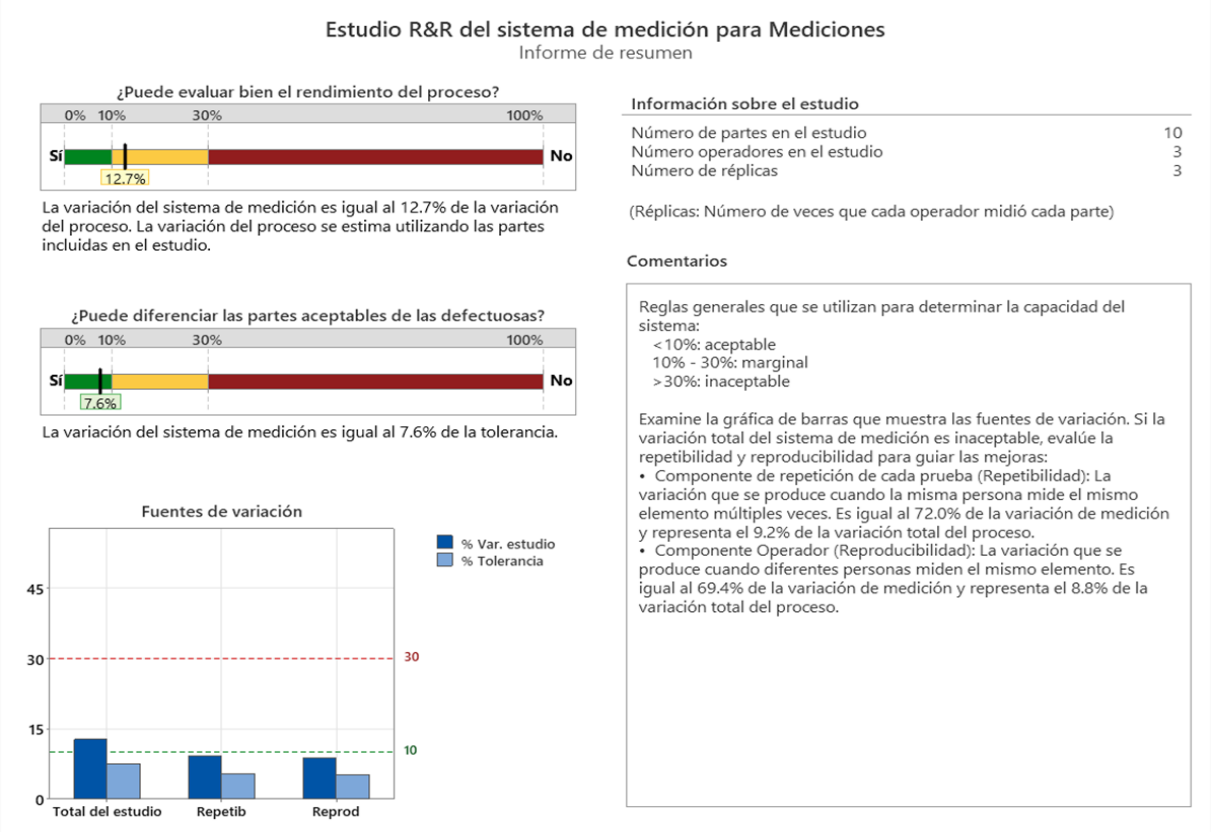
Nota: Se tomo foto de manera ilustrativa, como el inspector realiza la medición con indicaciones mencionadas. Elaboración propia (2025).

Una vez implementadas estas modificaciones en el método de medición, se realizó un nuevo estudio R&R. Asimismo, con base en las tolerancias especificadas por la norma ANCE, se evaluó si el sistema de medición cumple con los criterios normativos y proporciona resultados confiables en cuanto a precisión y repetibilidad.

R&R Base Norma

Figura 29

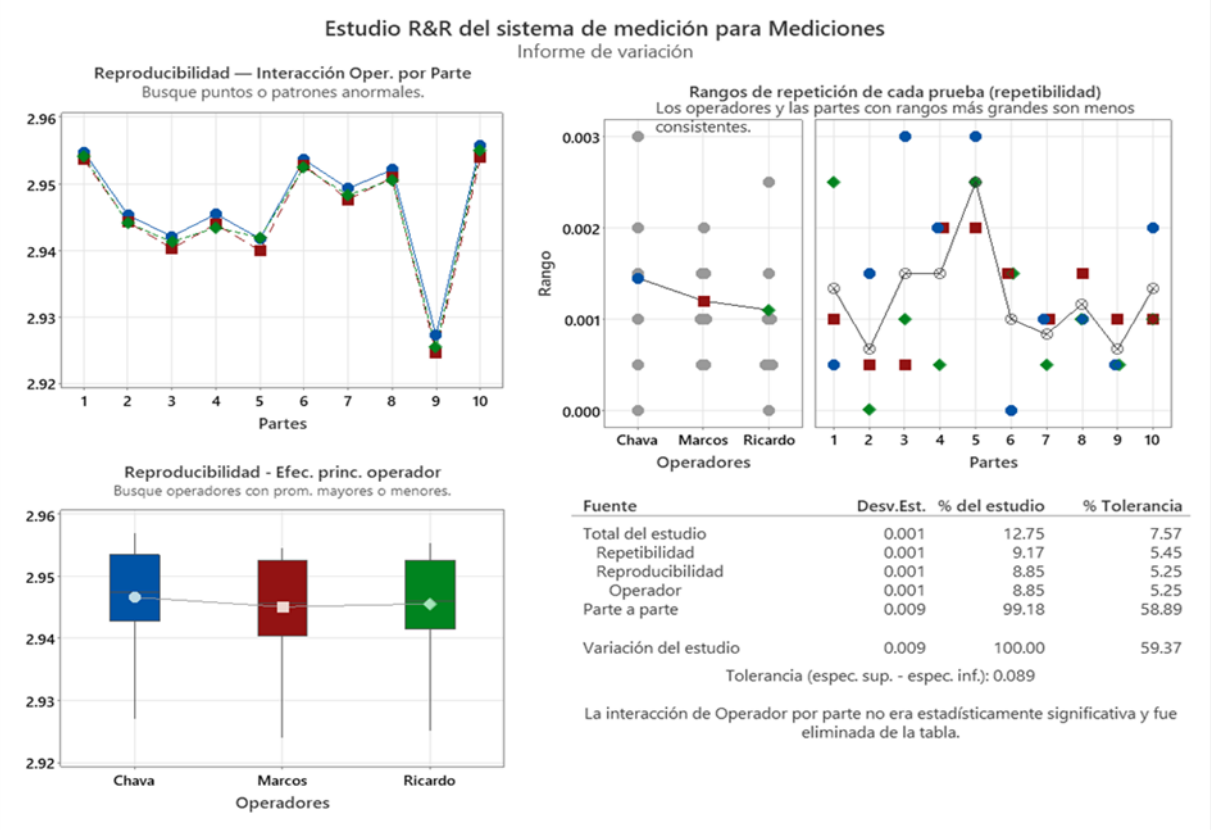
R&R resultados con las modificaciones y base Norma 1.0



Nota: Esta Figura obtenida del análisis de MiniTab, nos incluye el resultado de este estudio con las modificaciones del inspector, y, además, en base normatividad para revisar su aseguramiento y cumplimiento.

Figura 30

R&R resultados con las modificaciones y base Norma 1.1



Nota: Esta Figura obtenida del análisis de MiniTab, nos incluye el resultado de este estudio con las modificaciones del inspector, y además, en base normatividad para revisar su aseguramiento y cumplimiento.

Conclusión

A partir de los resultados obtenidos en el estudio R&R inicial, se identificó que el sistema de medición presentaba una variabilidad total del 18.3 %, lo que comprometía la precisión y confiabilidad de los datos recolectados. Esta situación representaba un riesgo para las etapas posteriores del proyecto, como el análisis de capacidad del proceso y el diseño de experimentos (DOE), ya que una medición deficiente podría distorsionar los resultados y afectar la toma de decisiones basada en datos.

Posteriormente, se realizaron ajustes en el procedimiento de medición, incluyendo la actualización del método de prueba y la estandarización de las prácticas

operativas del personal. Con estas acciones, se llevó a cabo un segundo estudio R&R, en el cual la variabilidad se redujo a un 12.7 %, alcanzando un nivel aceptable conforme a los criterios estadísticos y normativos establecidos. Esta mejora permitió validar la fiabilidad del sistema de medición para su uso en los análisis siguientes, asegurando que los datos recolectados reflejan adecuadamente el comportamiento real del proceso.

Para ofrecer una comparación clara de los resultados antes y después de la intervención, se presenta la Tabla 8. Esta tabla resume los principales indicadores del sistema de medición, facilitando la interpretación de los avances obtenidos mediante una representación visual simple y directa.

Tabla 8

Comparativa visual de los estudios R&R

Aspecto evaluado	Antes del ajuste	Después del ajuste
% Variabilidad total R&R	18.3%	12.7%
Estado del sistema	Inaceptable	Aceptable
Confiabilidad medición	Moderada	Alta

Nota: Elaboración propia.

Acción de Mejora

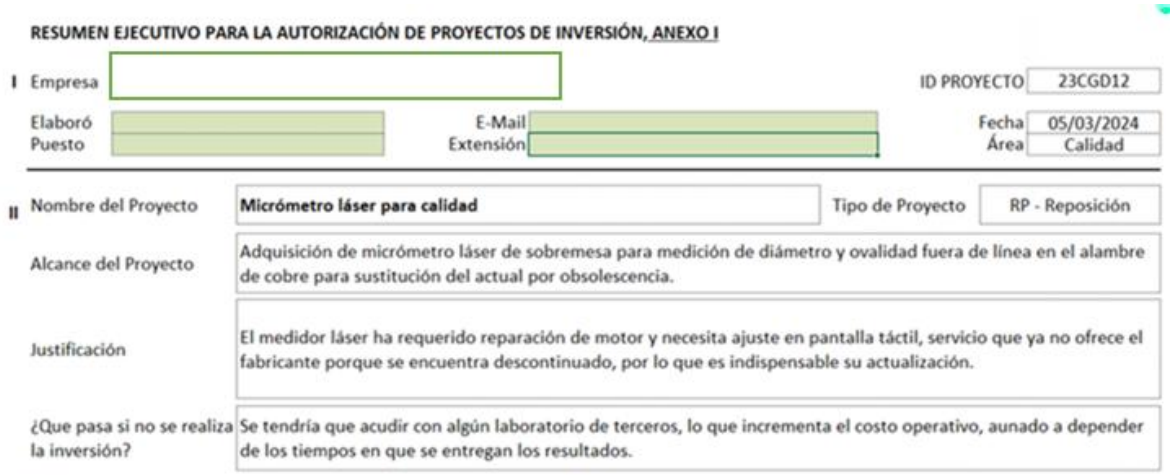
Como parte del proceso de mejora continua y con el objetivo de optimizar el sistema de medición, se presentó ante la dirección la propuesta para adquirir un nuevo equipo. En dicha presentación se destacaron los avances obtenidos en los estudios R&R y se justificó la necesidad del reemplazo, haciendo énfasis en la obsolescencia del equipo actual, sus fallas recurrentes en el motor rotatorio y la dificultad para conseguir refacciones.

Se resaltó también la importancia de contar con un equipo de mayor resolución, capaz de reducir la variación en las mediciones y facilitar la estandarización del procedimiento. Estos elementos son fundamentales para garantizar la calidad del producto y la confiabilidad de los datos en procesos críticos.

Como respaldo documental de esta propuesta, se incluyó la carátula del proyecto elaborada por el departamento de Ingeniería, mostrada en la Figura 31. Esta formaliza la iniciativa y da seguimiento a la mejora planteada en el área de calidad.

Figura 31

Caratula de proyecto, para nuevo equipo de medición de diámetro



RESUMEN EJECUTIVO PARA LA AUTORIZACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN, ANEXO I

I	Empresa			ID PROYECTO	23CGD12
	Elaboró		E-Mail	Fecha	05/03/2024
	Puesto		Extensión	Área	Calidad
II	Nombre del Proyecto	**Micrómetro láser para calidad**		Tipo de Proyecto	RP - Reposición
	Alcance del Proyecto	Adquisición de micrómetro láser de sobremesa para medición de diámetro y ovalidad fuera de línea en el alambre de cobre para sustitución del actual por obsolescencia.			
	Justificación	El medidor láser ha requerido reparación de motor y necesita ajuste en pantalla táctil, servicio que ya no ofrece el fabricante porque se encuentra descontinuado, por lo que es indispensable su actualización.			
	¿Que pasa si no se realiza la inversión?	Se tendría que acudir con algún laboratorio de terceros, lo que incrementa el costo operativo, aunado a depender de los tiempos en que se entregan los resultados.			

Note: Esta carátula se creó, a partir de los hallazgos encontrados y como parte de la mejora del área. Elaboración por ingeniería y propia (2025).

3.2. Definición de los factores prioritarios a intervenir

La priorización de variables a intervenir debe estar basada en análisis multivariable y técnicas sistemáticas que permitan identificar las causas con mayor impacto en el desempeño del proceso (George, 2005).

Con base en la estrategia definida en esta sección, se priorizaron los factores críticos a intervenir en la reducción del sobrecontenido de cobre. La selección de estos factores se realizó considerando su impacto en la variabilidad del proceso, su relación con las principales causas raíz identificadas y la viabilidad de su modificación dentro de las condiciones operativas de la planta. En la Tabla 9 se

detallan estos factores prioritarios y las estrategias específicas que se implementarán para su optimización.

Tabla 9

Factores prioritarios por intervenir en la reducción del sobrecontenido de cobre

Factor Prioritario	Problema Identificado	Intervención Propuesta	Impacto Esperado	Indicadores Clave
Desgaste de los dados de trefilado	Genera una apertura mayor al diámetro nominal, aumentando el consumo de cobre.	Implementar monitoreo de desgaste y reemplazo basado en datos reales.	Reducción del sobrecontenido de cobre y mejora en la estabilidad del diámetro.	- % de reducción en sobrecontenido de cobre. - Costo anual de reemplazo de dados vs. costo de sobrecontenido antes de intervención.
Falta de estandarización en parámetros operativos	Variabilidad en tensión aplicada, voltaje de recocido y velocidad de línea afecta la estabilidad del proceso.	Optimización de parámetros mediante Diseño de Experimentos (DOE) y desarrollo de estándares operativos.	Disminución de la variabilidad y menor desperdicio de cobre.	- Reducción en variabilidad del diámetro (Cpk, Ppk). - % de reducción de desperdicio de cobre. - Costo anual ahorrado por estandarización de parámetros.
Deficiencias en el sistema de medición y monitoreo	Métodos manuales e inspección visual limitan la detección	Implementación de medidora láser en tiempo real y estudios R&R para	Mayor capacidad de respuesta ante desviaciones y reducción de	- % de precisión de medición tras implementación del láser. - Reducción en % de productos fuera de

Factor Prioritario	Problema Identificado	Intervención Propuesta	Impacto Esperado	Indicadores Clave
	oportuna de desviaciones en el diámetro.	evaluar precisión.	productos fuera de especificación.	especificación. - Costo de desperdicio antes y después de la mejora.
Desbalance en la frecuencia de ajustes del proceso	Ajustes reactivos generan desperdicio y retrabajos.	Implementar gráficos de control estadístico (SPC) y plan de control preventivo.	Mayor estabilidad del proceso y reducción de costos de material.	- Reducción en el número de ajustes correctivos. - % de reducción en desperdicio de cobre. - Costo de material antes y después de la implementación del plan SPC.

Nota: Esta Tabla nos ayuda a ver como cada factor impacta en el sobrecontenido de cobre. Elaboración propia (2025).

Impacto esperado

Los indicadores seleccionados permitirán evaluar el impacto de la intervención en términos de reducción de costos y eficiencia operativa. Con base en el análisis, se espera:

- **Disminución del sobrecontenido de cobre del 0.13% al nivel óptimo**, reduciendo el desperdicio de material.
- **Optimización del uso de dados de trefilado**, asegurando que su reemplazo se realice en función de su desgaste real y no de ciclos fijos.
- **Reducción en costos de producción**, gracias a la estandarización de parámetros operativos y mejoras en los métodos de medición.
- **Aumento en la eficiencia del proceso**, minimizando la necesidad de ajustes correctivos y retrabajos.

Estos cambios están alineados con la estrategia de intervención definida en el Marco Lógico y con la metodología DMAIC de Six Sigma, asegurando que cada acción esté respaldada por datos y que las mejoras implementadas sean sostenibles en el tiempo (Montgomery, 2020).

3.3. Metas de información

Las métricas de desempeño y capacidad del proceso son fundamentales para cuantificar la variabilidad, establecer la línea base y determinar el impacto de la mejora (Montgomery, 2020).

Para establecer un diagnóstico profundo y evaluar el impacto de la intervención, es fundamental definir las metas de información que orientarán la medición de las variables críticas del proceso de trefilado del cable 500 KCM. Estas metas están alineadas con la Matriz de Marco Lógico y la información analizada en la sección 2.2, asegurando que cada acción esté respaldada por datos objetivos y medibles.

Las metas de información reflejan el tipo de valor cuantitativo y cualitativo que se espera cambiar con la intervención, asegurando que cada métrica tenga una línea base inicial y una meta de mejora. Se centran en cuatro áreas clave: reducción del sobrecontenido de cobre, mejora en la estabilidad del proceso, optimización del sistema de medición y disminución del impacto financiero del sobreconsumo de cobre.

Tabla 10

Metas de información establecidas

Variable	Meta de Información	Unidad de Medida	Línea Base Inicial	Meta de Cambio Esperada
Sobrecontenido de cobre	Determinar la cantidad de cobre excedente en el cable 500 KCM.	% de sobrecontenido	0.25% (promedio mensual)	≤ 0.13%
Variabilidad del diámetro del conductor	Medir la dispersión del diámetro para identificar causas de sobrecontenido.	Ppk	Ppk = 0.32	Ppk > 1.00
Precisión en la medición del diámetro	Evaluar la precisión del sistema de medición con la medidora láser y estudios R&R.	% de error en medición	8-10% de error en inspección manual	≤ 5% de error en medición
Costo por sobrecontenido de cobre	Cuantificar el impacto financiero del sobreconsumo de cobre en el proceso.	MXN/anual	$85,545.55 MXN en 12 meses	Reducción del costo en al menos 13%
Frecuencia de ajustes en trefilado	Medir la cantidad de ajustes correctivos realizados por desviaciones de diámetro.	Número de ajustes/mes	15 ajustes correctivos por mes	Reducción de ajustes en al menos 20%

Nota: El costo por sobrecontenido es modificado por motivos de confidencialidad. Elaboración propia (2025).

3.3.1. Establecimiento de métricas base

Para evaluar la efectividad de la intervención, es necesario establecer una línea base de las métricas iniciales antes de implementar cualquier mejora. Esta línea base servirá como punto de comparación con los valores obtenidos después de la

intervención, asegurando que cualquier cambio sea medible y respaldado con datos.

Se presenta en la Tabla 11 los valores actuales de las métricas clave antes de la intervención:

Tabla 11

Métricas iniciales del proceso de trefilado

Variable	Valor Inicial (Antes de la Intervención)	Fuente de Datos
Sobrecontenido de cobre	0.25% en promedio.	Registros históricos de producción.
Variabilidad del diámetro del conductor	Ppk (capacidad real no normal): 0.32	Análisis de capacidad del proceso.
Precisión en la medición del diámetro	Error del 7-13% en mediciones manuales.	Estudios R&R de medición.
Costo por sobrecontenido de cobre	$85,545.55 MXN en 12 meses.	Reportes financieros de costos de producción.
Frecuencia de ajustes en trefilado	15 ajustes correctivos por mes.	Registros del área de mantenimiento y producción.

Nota: Así como la Tabla 3, el costo por sobrecontenido es modificado por motivos confidenciales. Elaboración propia (2025).

Los valores presentados en la Tabla 11 reflejan el estado inicial del proceso antes de la intervención, y constituyen un punto de referencia fundamental para evaluar el impacto de las mejoras implementadas.

A continuación, se exponen los análisis de capacidad del proceso, así como las gráficas de control correspondientes. Tal como se explicó previamente en el apartado 3.1, se verificó la confiabilidad del sistema de medición, lo cual permite avanzar con una interpretación estadística válida y representativa del comportamiento del proceso.

3.3.2. Capacidad del proceso y estabilidad

Para evaluar la estabilidad del proceso, se realizó un análisis de capacidad utilizando los datos corregidos tras la validación del sistema de medición en el estudio R&R. Esto garantizó que los cálculos de capacidad reflejaran con precisión la variabilidad del proceso, permitiendo establecer una línea base confiable antes de la optimización mediante DOE.

Antes de calcular los índices de capacidad del proceso (Ppk) y de capacidad potencial (Cpk), se realizó una prueba de bondad de ajuste con el objetivo de verificar si los datos seguían una distribución normal. Los resultados obtenidos mediante la prueba de Anderson-Darling indicaron que los datos no se ajustaban a una distribución normal ($p < 0.05$). Ante esta situación, se aplicó una transformación de Box-Cox para normalizar la distribución.

Una vez realizada la transformación, se verificó su validez y se procedió con el cálculo de los índices de capacidad sobre los datos transformados. Este procedimiento siguió una secuencia técnica validada para el análisis de capacidad, estructurada de la siguiente manera:

1. Identificación de la distribución de los datos (normal o no normal).
2. Aplicación de transformación Box-Cox en caso de datos no normales.
3. Verificación de la normalidad posterior a la transformación.
4. Si la transformación resulta válida, se realiza el análisis de capacidad normal.
5. En caso contrario, se aplica un análisis de capacidad para datos no normales.

Para contextualizar los resultados obtenidos, se consideró el marco teórico de Seis Sigma. La Tabla 12 muestra la relación entre el nivel Sigma, el número de defectos por millón de oportunidades (DPMO) y el rendimiento porcentual esperado. Esta tabla, adaptada de Pyzdek (2014), proporciona un referente cuantitativo útil para interpretar el nivel de desempeño del proceso intervenido.

Tabla 12

Determinación del Nivel Sigma

Nivel Sigma	DPMO	Rendimiento (%)
1 sigma	690,000	30.85%
2 sigma	308,000	69.15%
3 sigma	66,800	93.32%
4 sigma	6,210	99.38%
5 sigma	233	99.977%
6 sigma	3.4	99.99966%

Nota: esta Tabla obtenida de El Manual de Seis Sigma: Una Guía Completa para Cinturones Verdes, Cinturones Negros y Gerentes en Todos los Niveles de Thomas Pyzdek, nos ayuda a establecer el nivel sigma del proceso a intervenir.

Para determinar si un proceso puede considerarse estadísticamente capaz y estable, se emplean dos indicadores fundamentales: el índice de capacidad del proceso (Cpk) y el índice de desempeño del proceso (Ppk). En este estudio se utilizaron como criterios de aceptación los siguientes valores de referencia:

Cpk ≥ 1.33, lo que indica que el proceso se encuentra adecuadamente centrado dentro de los límites de especificación y presenta baja variabilidad.

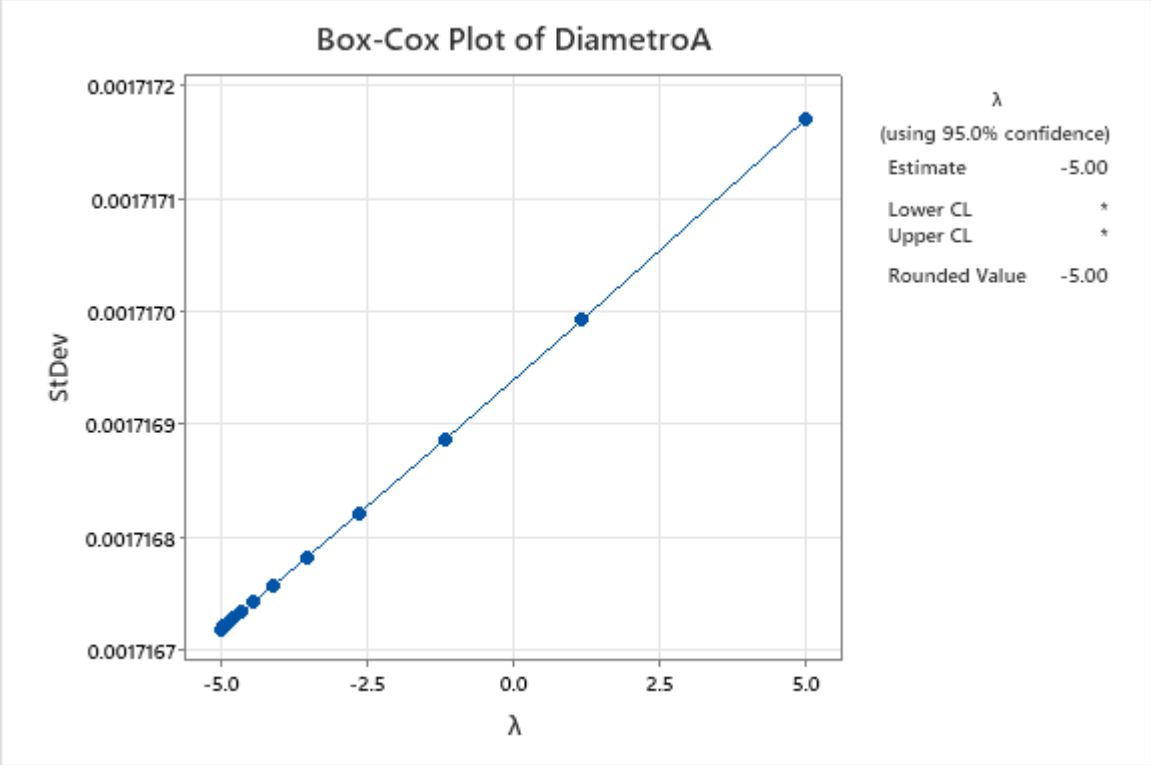
Ppk ≥ 1.00, lo que refleja que el desempeño real del proceso, considerando tanto su media como su dispersión, se mantiene dentro de un nivel aceptable.

Ambos valores están alineados con los estándares comúnmente aceptados en la industria manufacturera para procesos críticos de calidad.

A continuación, se presentan las Figuras 32 a 35, que ilustran los resultados del análisis de capacidad del proceso descrito previamente.

Figura 32

Prueba de normalidad



Nota: La Figura muestra la prueba de normalidad aplicada a los datos originales. Elaboración propia (2025).

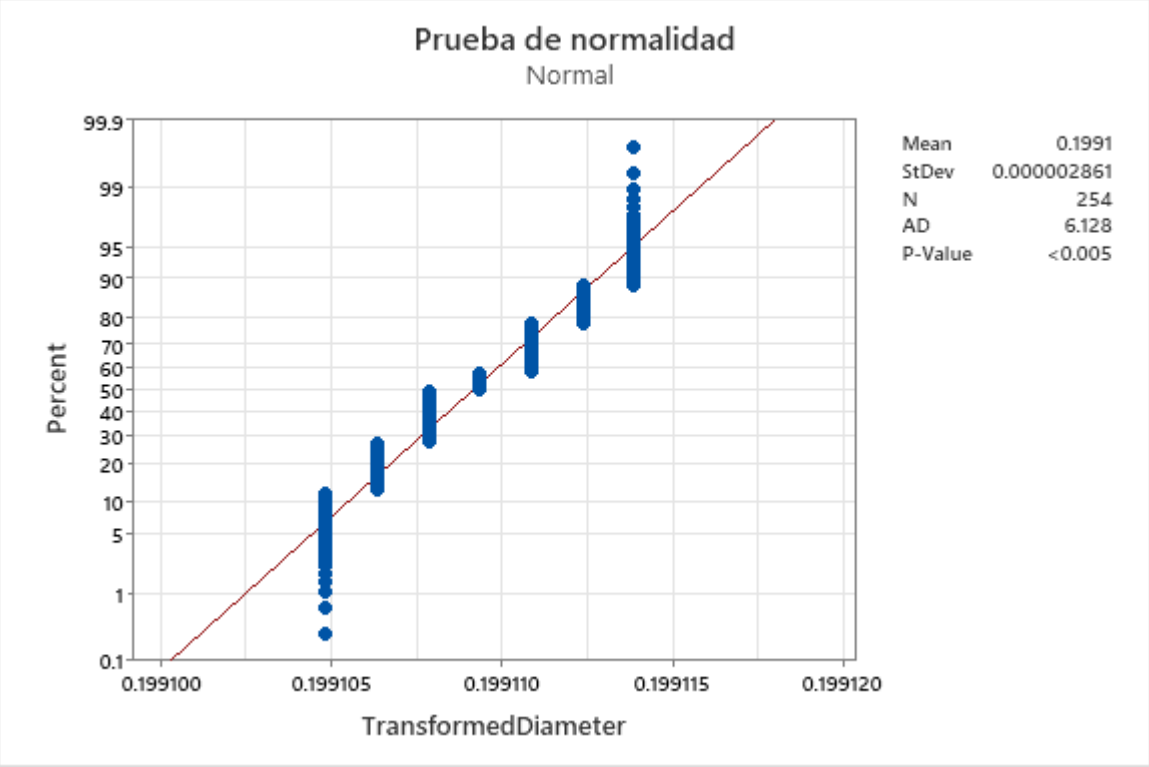
A partir del análisis realizado, MiniTab arrojó un valor de lambda de -5, lo cual indica la necesidad de transformar los datos mediante la metodología de Box-Cox. En consecuencia, se aplicó la siguiente fórmula de transformación:

X = (Datos**(-5)-1)/(-5)

Una vez transformados los datos, se procedió a realizar nuevamente la prueba de normalidad para verificar si, tras la transformación, la distribución de los datos se ajusta a una curva normal, como se muestra en la Figura 33.

Figura 33

Prueba de normalidad



Nota: prueba de normalidad realizada para determinar si los datos corresponden a una distribución normal o no normal. Elaboración propia (2025)

Dado que la prueba de normalidad no arrojó un valor p superior a 0.05, se concluye que los datos no siguen una distribución normal. Por lo tanto, se optó por realizar un análisis de capacidad utilizando métodos estadísticos para distribuciones no normales, con el fin de preservar la validez de los resultados.

Antes de proceder con dicho análisis, fue necesario identificar qué distribución se ajustaba mejor a los datos recolectados. La Tabla 13 presenta los resultados de las pruebas de bondad de ajuste aplicadas a diversas distribuciones, incluyendo los

valores de Anderson-Darling (AD), los p-valores asociados y los resultados de la prueba de razón de verosimilitudes (LRT P) para modelos con parámetros adicionales.

Tabla 13

Prueba identificación de la distribución de los datos

Distribution	AD	P	LRT P
Normal	6.139	<0.005	
Box-Cox Transformation	6.128	<0.005	
Lognormal	6.137	<0.005	
3-Parameter Lognormal	6.130	*	0.350
Exponential	116.357	<0.003	
2-Parameter Exponential	20.266	<0.010	0.000
Weibull	7.737	<0.010	
3-Parameter Weibull	7.288	<0.005	0.001
Smallest Extreme Value	7.743	<0.010	
Largest Extreme Value	6.239	<0.010	
Gamma	6.178	<0.005	
3-Parameter Gamma	52.253	*	0.000
Logistic	6.276	<0.005	
Loglogistic	6.275	<0.005	
3-Parameter Loglogistic	6.228	*	0.406

Nota: Datos obtenidos de Minitab. La distribución loglogistic de dos parámetros presentó el mejor ajuste con base en el valor de Anderson-Darling. Elaboración propia.

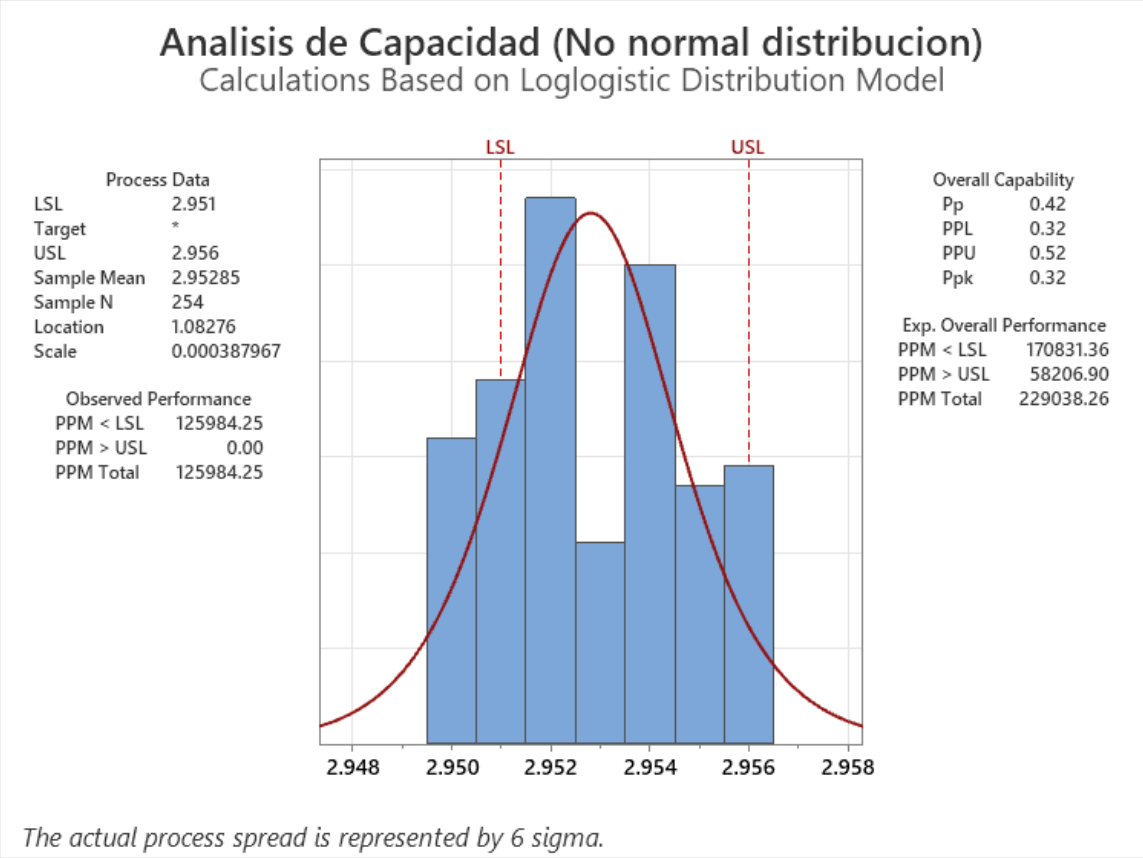
Después de evaluar múltiples opciones, se determinó que la distribución loglogistic de dos parámetros ofrecía el mejor ajuste estadístico, al presentar el menor valor de Anderson-Darling (AD = 6.275). Aunque ninguna de las distribuciones analizadas superó el umbral de significancia estadística ($p > 0.05$), lo que confirma que los datos no siguen una distribución normal, la selección se fundamentó en el equilibrio entre el ajuste obtenido y la simplicidad del modelo.

La comparación entre las versiones de dos y tres parámetros mediante la prueba de razón de verosimilitud mostró que no existía una mejora significativa al incluir un tercer parámetro (LRT P = 0.406). En consecuencia, se eligió la distribución loglogistic de dos parámetros como la opción más adecuada para realizar el análisis de capacidad del proceso bajo un enfoque no normal.

En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos y su correspondiente representación en la Figura 34

Figura 34

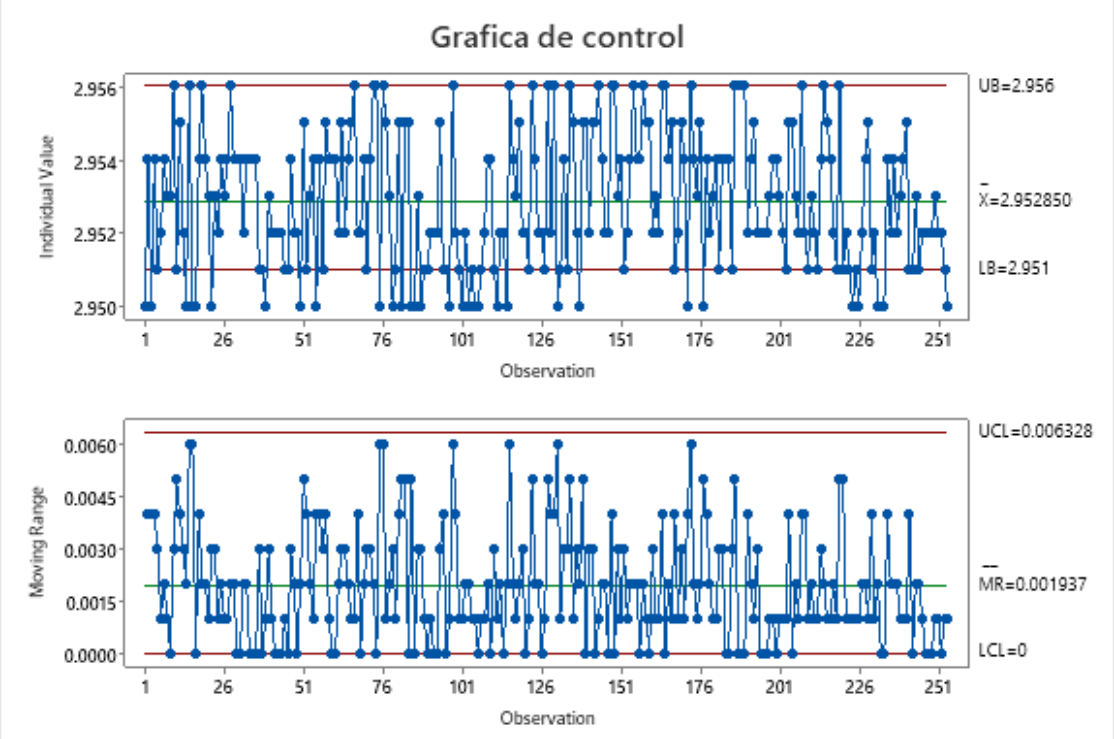
Análisis de capacidad de proceso



Nota: En esta prueba se determina el Ppk de nuestro proceso con la prueba de capacidad para una distribución no normal, fuente propia de MiniTab.

Figura 35

Gráfico de control



Nota: Grafico de control de proceso I-MR que muestra la distribución de los datos a lo largo del tiempo. elaboración propia 2025

Aunque los datos no presentaron una distribución normal, se optó por utilizar una gráfica de control tipo I-MR aplicada a los datos originales, dado que este tipo de gráfico es considerado robusto ante desviaciones moderadas respecto a la normalidad. Adicionalmente, no se detectaron puntos fuera de los límites de control ni se infringieron reglas estadísticas, lo cual permitió considerarla adecuada para fines de monitoreo del proceso. No obstante, se recomienda que, en controles rutinarios futuros, se utilice la versión transformada de los datos, a fin de obtener límites estadísticos más representativos y mejorar la sensibilidad del control.

3.3.3. Sigma del Proceso

El análisis indica un DPMO de 125,984, lo que corresponde a un nivel sigma de 2. Esto refleja un alto porcentaje de material fuera de especificación.

3.3.4. Cpk y Ppk

El resultado de Ppk es 0.32, lo que nos indica una distribución de los datos fuera de proceso.

Conclusión

Debido a que los datos no cumplieron la condición de normalidad, incluso tras aplicar una transformación Box-Cox (λ = -5), se realizó un análisis de capacidad no normal utilizando una distribución loglogistic. Este enfoque permitió evaluar adecuadamente el comportamiento real del proceso.

El resultado indicó una capacidad general limitada (Ppk = 0.32); sin embargo, este valor debe interpretarse con cautela, ya que el objetivo del proceso no es mantenerse centrado entre los límites de especificación, sino operar lo más cercano posible al límite inferior (LSL = 2.951 mm), sin comprometer la conformidad del producto.

El análisis estadístico evidenció que la media del proceso (2.95285 mm) se encuentra muy próxima al límite inferior de especificación, lo cual respalda el cumplimiento del objetivo del proyecto: reducir el contenido de cobre al mínimo posible dentro del rango técnico permitido. Esta estrategia permite optimizar el consumo de materia prima, manteniendo la conformidad del producto con los requisitos eléctricos establecidos. De acuerdo con Montgomery (2020), operar cerca de un límite de especificación inferior, siempre que se mantenga la estabilidad del proceso, puede ser una práctica válida en contextos de reducción de costos sin comprometer la calidad.

La proporción de productos por debajo del LSL (PPM < LSL = 125,984.25) evidencia la necesidad de afinar los parámetros operativos críticos, como el voltaje de recocido y la presión aplicada, para reducir la variabilidad y mantener el proceso dentro de especificación, pero siempre orientado a minimizar el sobrecontenido de cobre. Lo que nos arroja dichos estudios ayudó a entender el desempeño del

proceso y las complicaciones dentro de ellas, se harán los ajustes necesarios para seguir con el cumplimiento de las mismas y seguir asegurando el sistema. Por lo tanto, el valor de Ppk debe ser interpretado dentro del contexto de este proyecto, donde el control cercano al LSL, sin comprometer la calidad, representa el verdadero indicador de éxito operativo.

Impacto esperado

- Reducción del sobrecontenido de cobre a ≤ 0.13%, optimizando el consumo de materia prima.
- Optimizar el desempeño del proceso mediante control hacia el límite inferior, evaluado con Ppk y reducción de PPM fuera de especificación.
- Disminución del error en medición a ≤ 5%, garantizando mayor precisión en el control de calidad.
- Ahorro financiero del 13% en costos por sobreconsumo de cobre.

Estos cambios contribuirán significativamente a la reducción de costos, estabilidad operativa y cumplimiento normativo dentro de la organización.

Por último, incluimos un análisis de modo de falla del proceso de trefilado, para comprobar nuestros parámetros y tener una última revisión antes de empezar la etapa de mejora.

3.3.5. AMEF del trefilado 500 KCM

El Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF) es una herramienta clave en la prevención de errores y evaluación de riesgos potenciales en procesos críticos (DeFeo, 2017).

Figura 36

Análisis del Modo y Efecto de Falla (AMEF)

Paso 1: Identificación del riesgo			**Paso 2:** Evaluación del riesgo					
Situación o circunstancia NO DESEADA	**Consecuencias**	**Impacta a:**	**Severidad**	**Causas**	**Probabilidad**	**Controles actuales del proceso para prevenir**	**Detección**	**Prioridad**
(que pueden ocurrir con consecuencias negativas) CALIDAD AMBIENTAL SEGURIDAD ENERGIA		TE/CA/EN	Sev	(de que se presente el evento o circunstancia no deseada)	Occ	(para prevenir la causa del evento o circunstancia **no deseada**)	Det	NPR
Falta de alambrón 8 mm. En fecha requerido.	Paro general de toda el área de trabajo	TE	4	Mala programación en fechas solicitada con Conticon	2	Recepción oportuna de requerimiento de acuerdo al presupuesto y "flash" de ventas.	6	48
Falta de alambrón 8 mm. En fecha requerido.	Paro general de toda el área de trabajo	TE	6	Descompostura mecánica del transporte, Problemas de tráfico, circunstancias ambientales, problemas de seguridad	2	Contratación de Línea confiable de unidades de transporte, con un buen sistema de Mtto.	6	72
Diámetro menor o mayor al especificado	Desperdicio y reproceso	CA	6	Suministro de dados con el diámetro fuera de especificación	5	Cambio de líneas de dados oportuno	6	180
Diámetro menor al especificado	Desperdicio y reproceso	CA	6	Descompostura mecánica/eléctrica en pistón del dancer tensionadór, ojillos o poleas ranurados	3	Programa mensual y anual de mantenimiento preventivo. y stock de refacciones actualizadas	4	72
Diámetro menor al especificado	Desperdicio y reproceso	CA	6	Ajustes de tensión para cuidar la elongación	3	Programar condiciones de operación	4	72
Suavidad/elongación menor a lo especificado	Desperdicio y reproceso por material duro	CA	6	Exceso de tensión , control de voltaje de recocedor, Aflojamiento de la línea al contacto de poleas en recocedor, falla eléctrica recocedor.	3	Chequeo permanente al producto por parte del operador de acuerdo a su método de inspección	5	90
Material raspado/rayado	Desperdicio y reproceso	CA	6	Dados fracturados, dados con desgaste	2	Programa de fechas de cambio y control de inventario de dados	4	48
Material con chisporroteo en zona de recocido	Desperdicio y reproceso	CA	6	Aro de Níquel, cinchos o poleas del recocedor ranurados.	3	Programa mensual y anual de mantenimiento preventivo	3	54
Material caliente y/o quemado en la zona de recocido	Desperdicio y reproceso	CA	6	Alta temperatura y falla en el suministro de emulsión lubricante y enfriamiento, ajuste deficiente en los niveles de soluble, Fallas de voltaje en recocedor.	3	Programa mensual y anual de mantenimiento preventivo, condiciones de operación y stock de refacciones actualizadas	4	72
Emulsión (soluble) bajo de concentración de acuerdo a lo especificado	Desperdicio por reventónes en línea del proceso	TE	8	Degradación y/o perdida de concentración de grasa, emulsión caduca y fuera de especificación	2	Programa de cambios de solubles de acuerdo a resultados de monitoreos	5	80
Emulsión (soluble) separación de la grasa en el agua	Paro general de la línea	TE	10	Falla en el sistema de enfriamiento con alta temperatura fuera de lo especificado	2	Programa mensual de mantenimiento preventivo y limpieza de los intercambiadores de calor	5	100
Emulsión con exceso de Finos de cobre	Desperdicio y reventón de línea en el proceso	TE	6	Descompostura de el sistema de filtrado.	3	Programa mensual y anual de mantenimiento preventivo	4	72

Clasificación de riesgo por tipo de causa	
EXTERNO	1-199
INTERNO	200-299
	>300

Nota: Este AMEF se usó solo para el área de trefilado, donde hasta el momento, no se encontró un índice muy alto de posible falla. Elaboración propia (2025).

El AMEF mostrado en la Figura 36 se utilizó para anticipar posibles fallos en las actividades clave del proceso de trefilado, evaluando su severidad, ocurrencia y detección (Mozo, 2019).

Del análisis conjunto se identificó que la variable con el NPR más alto es el diámetro del material. Si bien esta no se considera una característica crítica del proceso de fabricación, sí representa un factor clave respecto al sobrecontenido de cobre. Esta conclusión es consistente con lo representado en el diagrama de Ishikawa, en que se establece que las dos variables que influyen directamente en el diámetro son la presión y el recocido de la máquina. Ambas fueron identificadas previamente en el análisis de causa raíz, lo que refuerza su relevancia dentro del proceso. En consecuencia, se recomienda implementar acciones de mejora focalizadas en estas variables para contribuir a la reducción del sobrecontenido y al cumplimiento del objetivo establecido.

CAPÍTULO 4

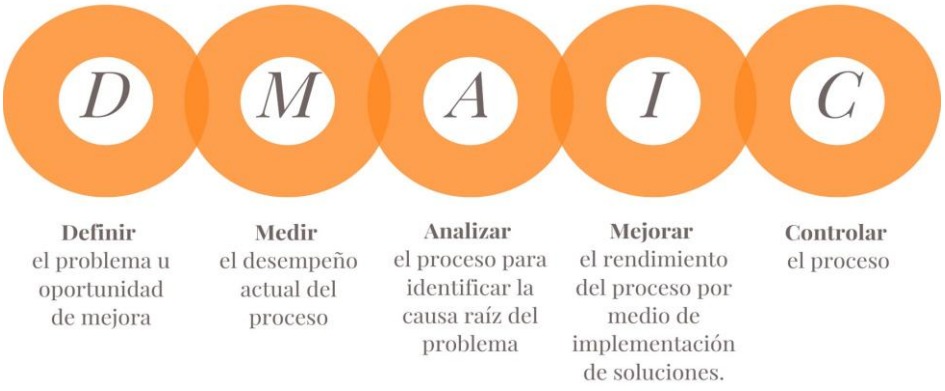
Implementación: Planeación de la intervención

La implementación de la estrategia de intervención es una fase crítica en el proceso de mejora, ya que define las acciones concretas para reducir el sobrecontenido de cobre en el trefilado del cable 500 KCM. Este capítulo detalla de manera estructurada y coherente las actividades planificadas, los recursos involucrados y la estrategia para asegurar una transición efectiva hacia la nueva condición deseada del proceso.

La planeación de la intervención se ha desarrollado considerando la metodología DMAIC de Lean Six Sigma, garantizando que cada acción tenga una base estadística y operativa sólida. Las actividades se han diseñado de acuerdo con los hallazgos del análisis previo y se enfocan en la optimización de variables críticas del proceso.

Figura 37

Herramientas de la metodología DMAIC



Nota: Figura ilustrativa de la metodología utilizada en el proyecto, del autor: Pierce, A. (s. f.). DMAIC y otras herramientas Six Sigma para potenciar la mejora continua. Imagineer Customer Experience. Recuperado 6 de noviembre de 2022, de https://blog.imagineer.co/es/estrategia/dmaic/dmaic-y-otras-herramientas-six-sigma-para-potenciar-la-mejora-continua

4.1. Justificación de la intervención

Validar la causa raíz antes de intervenir es un principio central de la mejora continua, pues asegura que la solución propuesta atienda el verdadero origen del problema y no sus síntomas (Pyzdek & Keller, 2019).

La estrategia metodológica definida en este proyecto se fundamenta en los hallazgos del diagnóstico profundo, donde se identificaron y analizaron las variables críticas que impactan el sobrecontenido de cobre en el proceso de trefilado del cable 500 KCM. A través del análisis de sistemas de medición, estudios R&R, análisis de capacidad y DOE, se determinó que las principales variables influyentes son:

- Desgaste de los dados de trefilado, que genera una apertura mayor al diámetro nominal, aumentando el consumo de cobre.
- Falta de estandarización en parámetros operativos, específicamente en la tensión aplicada, voltaje de recocido y velocidad de línea, lo que afecta la estabilidad del proceso.
- Deficiencias en el sistema de medición y monitoreo, limitando la detección oportuna de desviaciones en el diámetro del conductor.

Con base en estos factores, la estrategia de intervención sigue la metodología DMAIC de Lean Six Sigma, asegurando que cada acción tenga una base estadística y operativa sólida. Esto permitirá una reducción efectiva del sobrecontenido de cobre sin comprometer la calidad del producto, garantizando beneficios operativos y económicos para la empresa.

4.1.1. Validación de causa raíz.

La validación de la causa raíz se realizó mediante un enfoque estructurado basado en herramientas de análisis de calidad y metodologías estadísticas. Durante el diagnóstico profundo, se aplicaron herramientas como el Diagrama de Ishikawa, el Análisis de Pareto y el Estudio de Capacidad del Proceso, con el objetivo de identificar y cuantificar los factores más influyentes en el sobrecontenido de cobre del cable 500 KCM.

Resultados del análisis de causa raíz:

- Diagrama de Ishikawa: Se establecieron cinco categorías principales que impactan el sobrecontenido de cobre: Máquina, Material, Método, Medio Ambiente y Mano de Obra. Dentro de estos, se confirmó que el mayor impacto proviene de la categoría Método, donde las principales variables críticas son la velocidad de trefilado, la presión/tensión y el desgaste de los dados de trefilado.
- Estudio de Capacidad del Proceso: Se identificó que el proceso actual no cumple con los límites de especificación, presentando un Ppk inferior a 1, lo que indica que la variabilidad del diámetro del conductor es demasiado alta y genera sobreconsumo de cobre.

Conclusión:

A partir de estos análisis, se validó que la causa raíz principal del sobrecontenido de cobre se debe a la falta de control sobre las variables críticas del proceso, lo que genera una variabilidad excesiva en el diámetro final del conductor. La estrategia de intervención se centrará en la estandarización y control de estos parámetros, asegurando que la variabilidad se reduzca a niveles aceptables y que el proceso alcance una capacidad adecuada.

La intervención responde a las oportunidades detectadas en el análisis FODA (fortaleza técnica, disponibilidad de datos) y se orienta al cumplimiento del CTQ principal: mantener el diámetro del conductor dentro de los límites de 2.951 – 2.956 mm con mínimo desperdicio de cobre.

Con base en el análisis previo, se definió un diseño factorial 2^2 para evaluar la interacción entre presión y voltaje, variables identificadas como críticas en el AMEF y en los análisis de capacidad. Este diseño se describe en detalle en la sección 5.2.2.

4.2. Actividades, herramientas e instrumentos

Las herramientas seleccionadas permiten no solo implementar, sino también monitorear y ajustar la solución, garantizando su sostenibilidad en el tiempo (Montgomery, 2020).

La estrategia de intervención se implementará mediante una serie de actividades estructuradas, apoyadas en herramientas de calidad y metodologías estadísticas que aseguren la reducción del sobrecontenido de cobre en el trefilado del cable 500 KCM. Todas las actividades se han diseñado en concordancia con los objetivos del TOG y los hallazgos del diagnóstico profundo.

Actividades principales de la intervención:

- Monitoreo del desgaste de los dados de trefilado: Implementación de inspecciones sistemáticas con medición de diámetro en intervalos predefinidos.
- Optimización de condiciones de operación del área de trefilado: Ajuste gradual de parámetros operativos y análisis del impacto en la estabilidad del proceso.
- Capacitación en medición y monitoreo de parámetros críticos: Formación del personal de calidad y producción para asegurar la correcta aplicación de estándares de medición.
- Seguimiento estadístico de la variabilidad del proceso: Uso de gráficos de control y análisis de capacidad para validar mejoras implementadas.

Herramientas y metodologías utilizadas:

Para garantizar la efectividad de la intervención, se emplearán herramientas avanzadas de calidad y análisis de datos, incluyendo:

- Control Estadístico de Procesos (CEP): Para monitorear la estabilidad de las variables críticas.

- Diseño de Experimentos (DOE): Para evaluar la influencia de los factores críticos y optimizar los parámetros de trefilado.
- Análisis de Capacidad del Proceso: Para verificar si el proceso mejorado cumple con los límites de especificación.
- Estudios de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R): Para asegurar la confiabilidad del sistema de medición.
- Diagramas de Pareto e Ishikawa: Para evaluar la efectividad de las soluciones implementadas.

La combinación de estas actividades y herramientas permitirá una implementación estructurada y basada en datos, asegurando que los cambios realizados contribuyan a una reducción efectiva del sobrecontenido de cobre y a la optimización del proceso de trefilado.

4.3. Etapas del proceso de aplicación de la intervención

El diseño detallado del cronograma permite anticipar recursos, asegurar tiempos de ejecución y facilitar el seguimiento de avances (George, 2005b).

Para garantizar una implementación estructurada y alineada con la estrategia de intervención, el proceso se desarrollará en tres etapas principales, considerando los recursos temporales, económicos y humanos disponibles. Estas etapas se diseñaron en función de los objetivos del TOG, asegurando una ejecución secuencial y con puntos de control que permitan evaluar el impacto de las acciones realizadas.

Etapa 1: Preparación y recolección de datos (Semana 1 – Semana 3)

- Capacitación del personal en medición y monitoreo de variables críticas.
- Implementación del sistema de monitoreo del desgaste de dados de trefilado.
- Establecimiento de la línea base del proceso a partir de datos históricos y mediciones iniciales.

Etapa 2: Optimización de condiciones de operación (Semana 4 – Semana 9)

- Aplicación de ajustes en la velocidad de trefilado y voltaje de recocido para reducir la variabilidad del proceso.
- Evaluación del impacto de los cambios en la estabilidad del proceso y en la reducción del sobrecontenido de cobre.
- Validación de los ajustes mediante estudios de capacidad y gráficos de control.

Etapa 3: Evaluación de resultados y control de proceso (Semana 10 – Semana 12)

- Análisis de reducción del sobrecontenido de cobre y comparación con la línea base.
- Ajustes finales y estandarización de los nuevos parámetros de trefilado.
- Implementación de plan de monitoreo continuo y documentación de mejoras establecidas.

4.3.1. Cronograma de la implementación de la estrategia

La Tabla 14 describe la alineación de cada acción con los objetivos estratégicos del TOG, los recursos necesarios para su ejecución y los plazos temporales estimados. La planificación se realizó considerando la disponibilidad de equipos, personal y condiciones operativas de la planta.

Tabla 14

Cronograma de implementación de la estrategia

Semana	Actividad	Objetivo	Recursos necesarios	Resultado esperado
1-3	Capacitación del personal en medición y monitoreo	Asegurar mediciones precisas y confiables	Material de capacitación, equipo de medición	Establecimiento de procedimientos estandarizados

Semana	Actividad	Objetivo	Recursos necesarios	Resultado esperado
4-9	Optimización de condiciones de operación	Ajustar velocidad de trefilado y voltaje de recocido para reducir variabilidad	Software de monitoreo, equipo de producción y supervisión de calidad	Disminución de desviaciones en el diámetro y mejora en la estabilidad del proceso
10-12	Evaluación de resultados y ajustes finales	Validar mejoras y documentar procedimientos optimizados	Análisis estadístico, reportes de calidad	Implementación de parámetros operativos estandarizados

Nota. El cronograma se ajustará según el desarrollo de cada fase y la disponibilidad operativa de la planta. Elaboración propia (2025).

4.3.2 Imprevistos

La anticipación de posibles imprevistos permite reducir la incertidumbre en la implementación y aumentar la capacidad de respuesta ante cambios inesperados (DeFeo, 2017).

Durante la implementación surgieron retrasos menores debido a la disponibilidad operativa limitada. Estos se resolvieron priorizando actividades críticas y utilizando turnos alternativos para pruebas. Además, se reforzó la capacitación para mitigar la resistencia inicial al cambio, facilitando la aceptación y sostenibilidad de la mejora.

Posibles imprevistos y estrategias de mitigación:

- **Fallas en el sistema de monitoreo del desgaste de dados**: Si el monitoreo automatizado presenta fallas técnicas, se establecerán verificaciones manuales de respaldo y se realizarán inspecciones visuales con mayor frecuencia.
- **Variabilidad en la producción debido a factores no controlados:** Si la optimización de condiciones de operación no genera los resultados

esperados, se realizarán ajustes iterativos en los parámetros de trefilado y se evaluará su impacto en un periodo de prueba extendido.

- **Resistencia al cambio por parte del personal:** Para reducir la oposición a la implementación de nuevas prácticas, se reforzará la capacitación y se llevarán a cabo sesiones de sensibilización sobre los beneficios de la optimización del proceso.
- **Restricciones de tiempo en la implementación de mejoras:** Si surgen retrasos en la ejecución de ajustes operativos debido a la carga de producción, se priorizarán las actividades de mayor impacto y se realizarán pruebas en turnos de menor demanda operativa.

La identificación y manejo de estos imprevistos garantizará que la estrategia de intervención se implemente de manera efectiva, minimizando el impacto de factores externos y asegurando la sostenibilidad de las mejoras realizadas.

CAPÍTULO 5

Implementación: Exposición de hallazgos

Este capítulo presenta los hallazgos obtenidos tras la implementación de la estrategia de intervención para la reducción del sobrecontenido de cobre en el trefilado del cable 500 KCM. Se analizan los resultados alcanzados en relación con los objetivos planteados, el impacto de las acciones implementadas y la comparación de la condición inicial y final del proceso.

Los resultados de esta etapa son fundamentales para evaluar la efectividad de la metodología utilizada y validar si las mejoras aplicadas han generado una reducción significativa del sobrecontenido de cobre. Asimismo, se presentan indicadores clave de desempeño, comparaciones estadísticas y análisis cualitativos que respaldan las conclusiones de este estudio.

La información expuesta en este capítulo constituye el entregable correspondiente a la materia IDI III, y será presentada en el coloquio de la asignatura, donde se discutirán los impactos generados por la intervención y se recibirán observaciones para su fortalecimiento.

5.1 Sistematización y medición de resultados

Los datos presentados han sido validados estadísticamente mediante el análisis de repetibilidad y reproducibilidad (R&R), asegurando su confiabilidad para la evaluación de resultados (Montgomery, 2020).

La medición de los resultados obtenidos en la intervención se realizó a través de un enfoque estructurado basado en herramientas estadísticas y de control de calidad, asegurando una evaluación objetiva del impacto de las mejoras implementadas.

Metodología de sistematización de datos

Para garantizar la trazabilidad y confiabilidad de los datos, se estableció un proceso de recopilación basado en mediciones periódicas del diámetro del conductor antes y después de la intervención. Se utilizó un sistema de registro digital, donde se documentaron las variaciones en las variables críticas identificadas previamente, como el desgaste de los dados de trefilado, la velocidad de trefilado y el voltaje de recocido.

Escala de medición utilizada

El análisis de los datos se llevó a cabo mediante una escala de medición **cuantitativa y continua**, con la cual se midió la variabilidad del diámetro del conductor antes y después de la implementación de la estrategia de intervención. Se utilizaron las siguientes métricas clave:

Media y desviación estándar del diámetro del conductor, para evaluar la estabilidad del proceso.

Ppk (Índice de capacidad del proceso), para determinar si las mejoras lograron mantener el diámetro dentro de las especificaciones.

Comparación de sobrecontenido de cobre antes y después de la intervención, utilizando pruebas estadísticas como *t-Student* para validar la reducción de la variabilidad.

Aplicación del sistema de medición

Se realizaron mediciones en intervalos predefinidos antes, durante y después de la intervención.

- Los datos fueron analizados mediante software estadístico (*Minitab, Excel*) para validar la reducción del sobrecontenido de cobre.
- Se establecieron gráficos de control para evaluar la estabilidad del proceso lo que permitió identificar desviaciones y reducir la variabilidad, siguiendo los principios de mejora continua basada en control estadístico del proceso (Gejdoš, 2015).

- Con base en esta sistematización, se presenta en las siguientes secciones un análisis detallado de los resultados obtenidos y su impacto en la reducción del sobrecontenido de cobre.

5.2 Organización de la información obtenida

Para garantizar una interpretación clara de los datos recabados durante la intervención, esta sección presenta la información sistematizada a través de Tablas y gráficos. Se busca mostrar cómo, mediante el uso de herramientas estadísticas, fue posible identificar que las variables presión (tensión aplicada) y voltaje de recocido tenían un impacto significativo sobre el contenido de cobre en el cable 500 KCM.

Estas variables fueron seleccionadas como críticas tras validar su relevancia a través del Análisis de Ishikawa, el estudio de capacidad del proceso y los resultados obtenidos en el Diseño de Experimentos (DOE), conforme a la fase "Analizar" de la metodología DMAIC (Montgomery, 2020; Pyzdek & Keller, 2019).

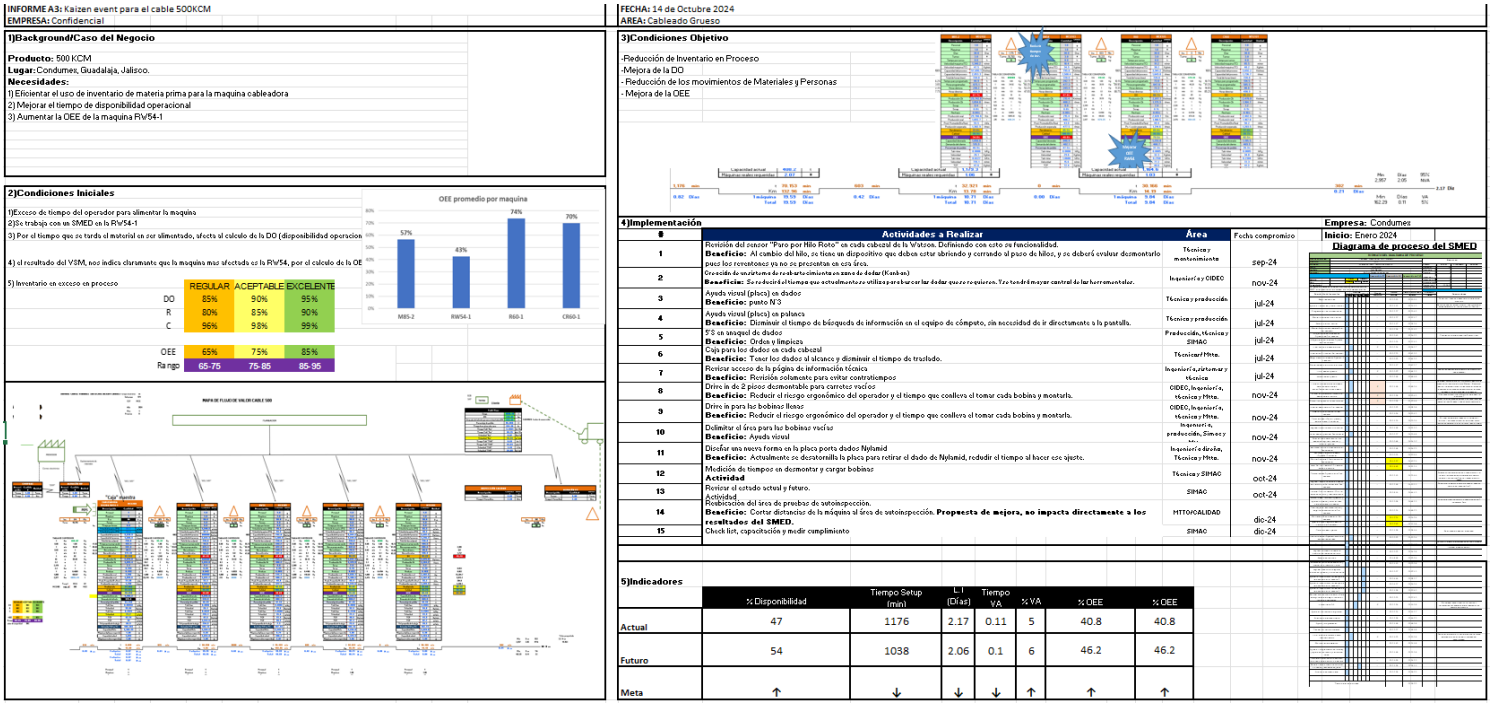
Al inicio de nuestro documento, se presentó un mapa de cadena de valor, que a este punto, tomó relevancia en la etapa de análisis, para identificar posibles variables críticas, en ello, se trabajó en algunos eventos Kaizen, de manera que se realizó un A3 para la elaboración de estas mejoras y exponer los hallazgos.

Para organizar adecuadamente la información obtenida durante la intervención, se presentan a continuación en la Figura 38, los resultados estructurados en dos bloques principales: primero, los eventos de mejora rápida (Kaizen Events) relacionados con el flujo operativo general; y segundo, el diseño de experimentos (DOE) enfocado en identificar las variables críticas presión y voltaje. Esta estructura permite visualizar la evolución del análisis y el soporte estadístico que sustenta la intervención.

5.2.1 A3 Kaizen Event (VSM)

Figura 38

Formato A3 del evento Kaizen para la mejora del sobrecontenido de cobre.



Nota: Elaboración propia con base en las fases de análisis, acción y resultados obtenidos. Elaboración propia (2025).

En este A3 mostrado en la Figura 38, se presentaron dos eventos kaizen en el área de cableado y en el área de estirado, los cuales afectaban al OEE. Para abordar esta situación, se elaboró un cronograma y un plan de trabajo específico, involucrando a los departamentos de ingeniería, calidad y producción.

El resultado fue satisfactorio, logrando mejoras significativas en el rendimiento y la disponibilidad operacional. Aunque el resultado fue positivo, no abordó la problemática del sobrecontenido, sino que se centró en otra área. Sin embargo, el mismo análisis y desarrollo nos ayudó a obtener mejoras productivas en otra sección de la compañía.

Tras la implementación del evento Kaizen y la validación de variables críticas mediante las herramientas de calidad, se procedió a diseñar un experimento formal para evaluar y confirmar el impacto de las variables presión (tensión aplicada) y voltaje de recocido sobre el sobrecontenido de cobre. Para ello, se aplicó un Diseño

de Experimentos (DOE) de tipo 2x2, que permite analizar de forma eficiente tanto los efectos individuales como la posible interacción entre ambas variables (Montgomery, 2020; Pyzdek & Keller, 2019). A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

5.2.2 DOE 2x2 (Diseño de experimentos)

El diseño de experimentos tipo 2x2 permitió aislar los efectos principales e interacción de las variables presión y voltaje sobre el contenido de cobre, validando su impacto con base en ANOVA (Pyzdek & Keller, 2019).

El diseño 2x2 fue seleccionado por su eficiencia en estudios exploratorios donde se busca identificar interacciones entre dos factores críticos con un número mínimo de ensayos, optimizando así recursos y tiempos de ejecución (Montgomery, 2020).

En este diseño de experimento, se emplearon 2 variables con 2 niveles, sus valores preestablecidos en condiciones de operación son los siguientes:

Voltaje: 36

Presión/tensión: 3

Se realizan pruebas con distintas combinaciones, y tomando como base la especificación más baja de diámetro (2.951 mm), conociendo este diámetro, se puede calcular el peso teórico del cable, esto nos ayudara a tomar los datos para el correcto muestreo.

Cálculo del diámetro a peso es 60.7626 g

El total de las corridas fueron 18 (Tabla 15), teniendo un amplio muestreo suficiente para no generar demasiado desperdicio y poder cumplir con la mejora deseada.

Tabla 15

Corridas realizadas para DOE 2x2

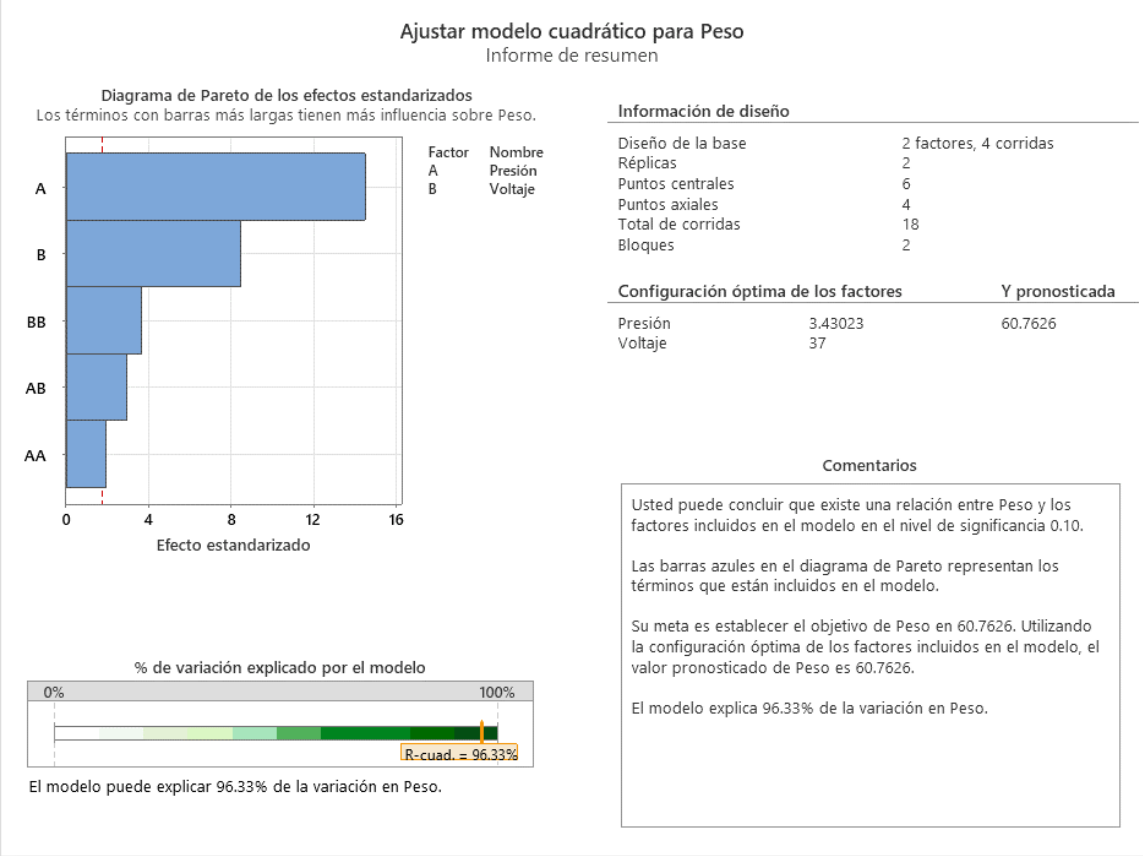
OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Presión	Voltaje	Peso
1	0	1	3	36	61.0493
2	1	1	4	34	60.8985
3	0	1	3	36	61.0155
4	1	1	4	37	60.5157
5	1	1	4	37	60.5976
6	1	1	2	34	61.2323
7	1	1	2	34	61.2274
8	1	1	2	37	61.016
9	1	1	4	34	60.9229
10	0	1	3	36	61.0278
11	1	1	2	37	61.0982
12	-1	2	3	34	61.0723
13	0	2	3	35.5	61.0672
14	-1	2	4	35.5	60.883
15	-1	2	2	35.5	61.2474
16	-1	2	3	37	60.9707
17	0	2	3	35.5	61.0717
18	0	2	3	35.5	61.0807

Nota: Corridas realizadas para evaluar los efectos de presión y voltaje sobre el sobrecontenido de cobre. Fuente: Elaboración propia con base en Montgomery (2020).

Las Figuras 39-43 nos muestran los resultados obtenidos en el estudio:

Figura 39

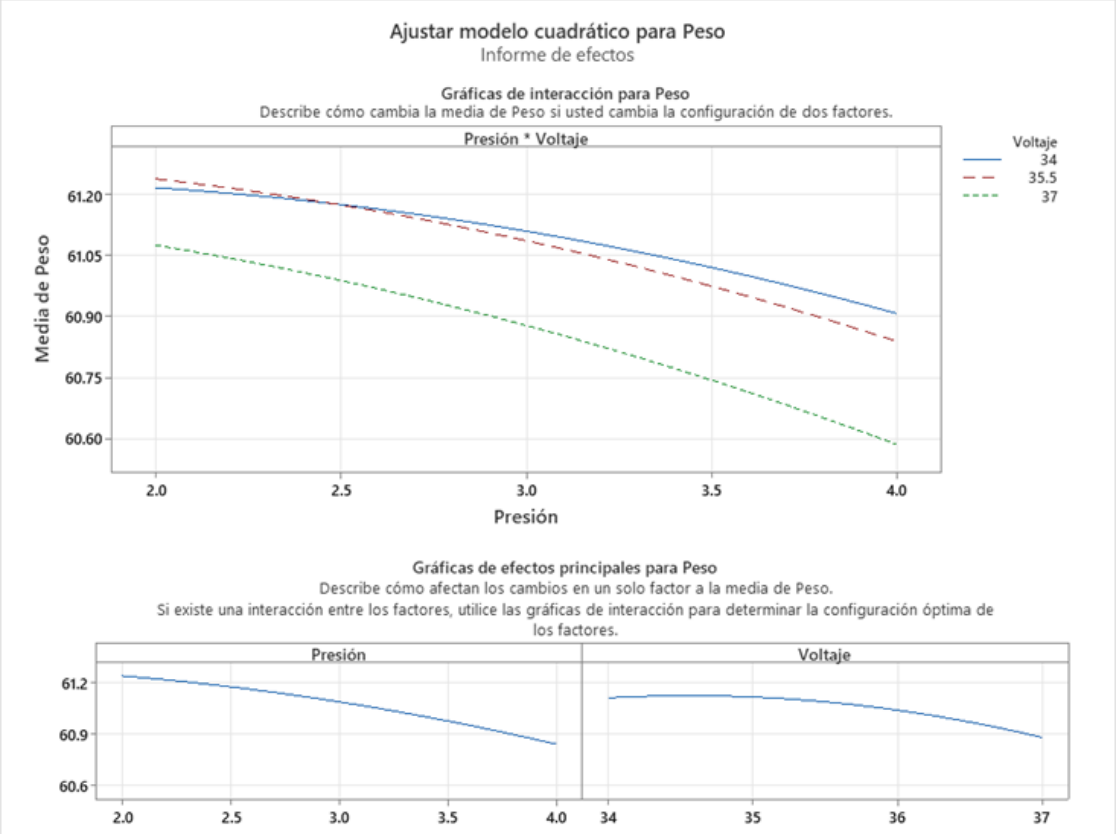
Resultados del Diseño de Experimentos (DOE 1) para la evaluación del efecto de las variables presión y voltaje sobre el contenido de cobre.



Nota: Resultados obtenidos del diseño de experimentos aplicado en el área de trefilado del cable 500 KCM. Fuente: Elaboración propia basada en Montgomery (2020) y datos internos de la empresa.

Figura 40

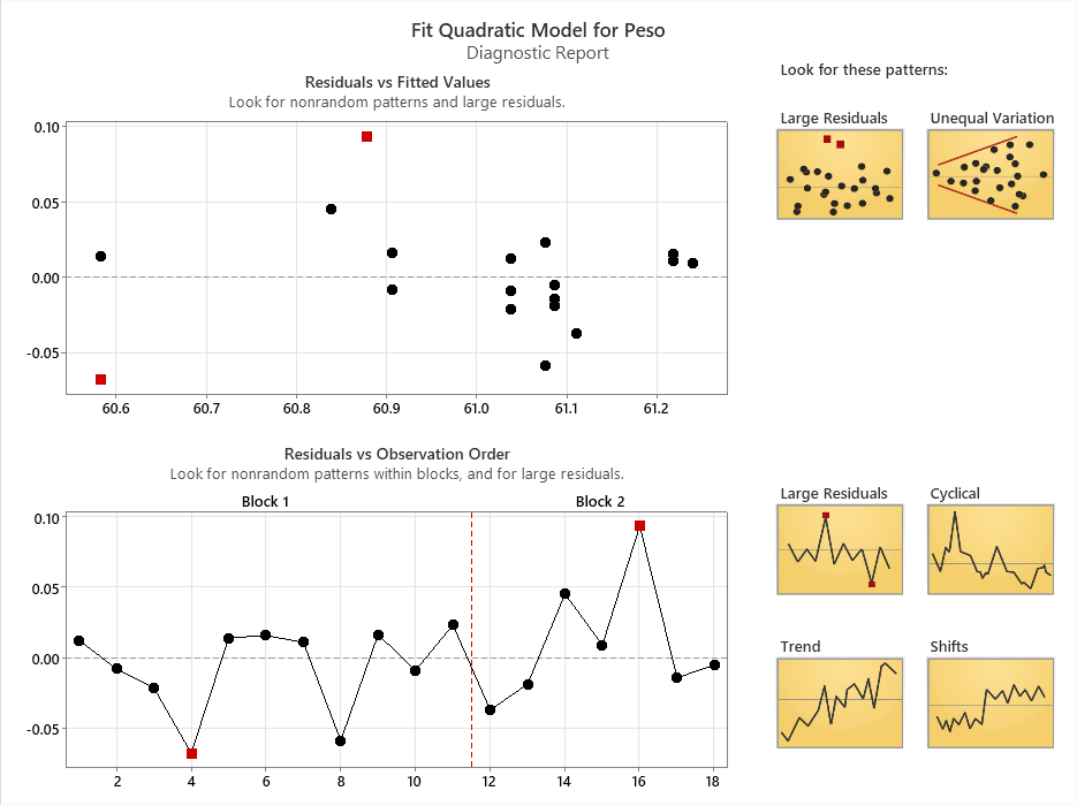
Resultados del Diseño de Experimentos (DOE 1.2) con ajuste fino de las variables presión y voltaje.



Nota. Gráfico que muestra el impacto preciso del ajuste fino de las variables presión y voltaje sobre la reducción del sobrecontenido de cobre en el cable 500 KCM, correspondiente a la segunda etapa experimental. Elaboración propia.

Figura 41

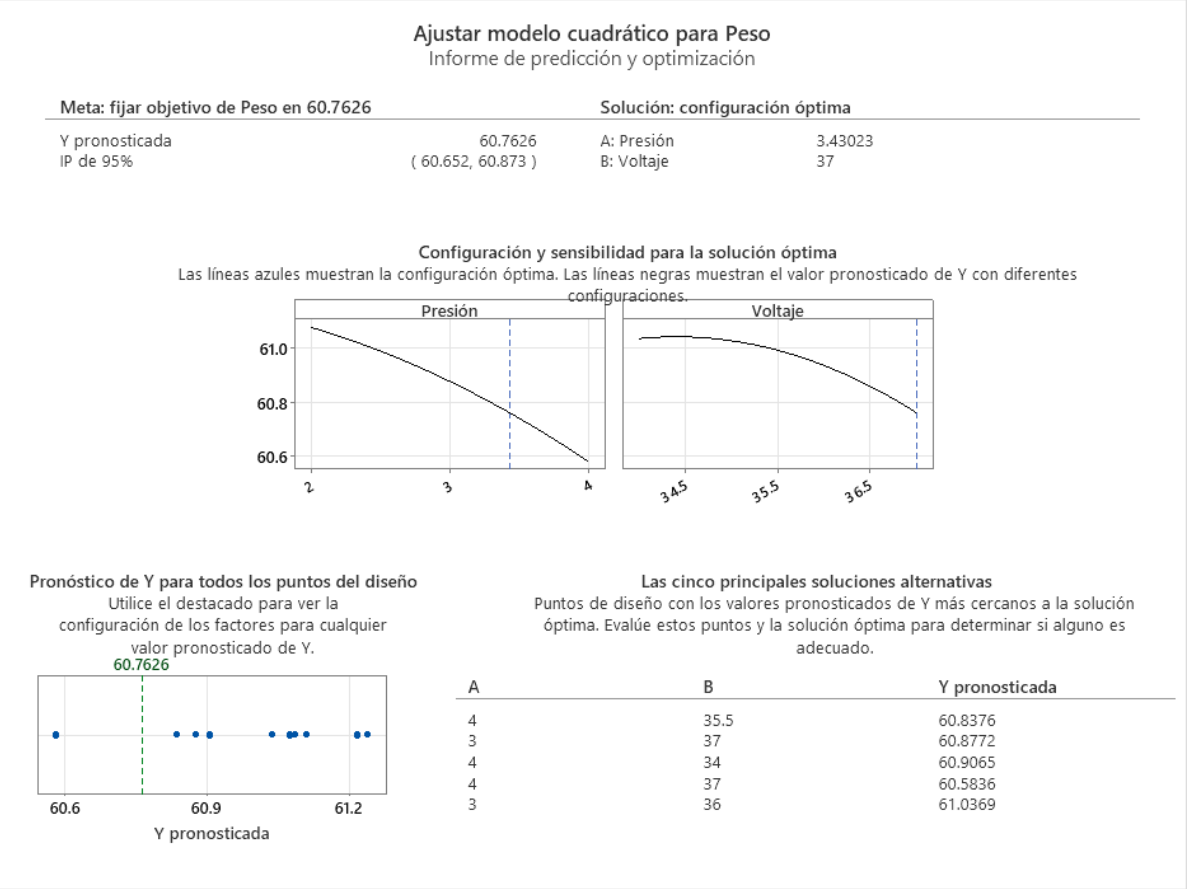
Resultados del Diseño de Experimentos (DOE 1.3) para la optimización final de presión y voltaje.



Nota: Gráfico que muestra los resultados obtenidos tras la optimización final de las variables presión y voltaje para reducir el sobrecontenido de cobre en el cable 500 KCM. Elaboración propia.

Figura 42

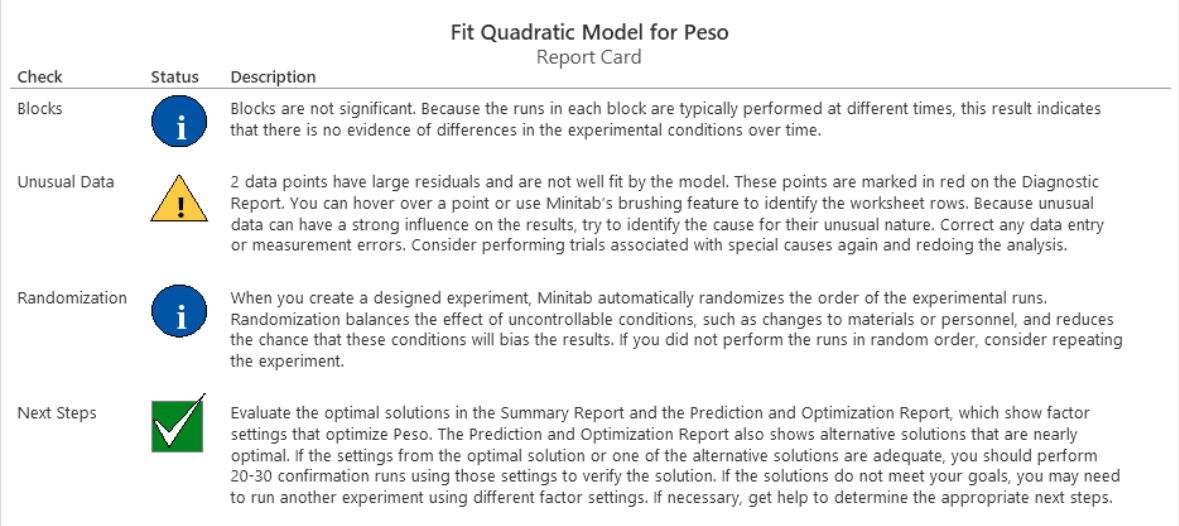
Resultados del Diseño de Experimentos (DOE 1.4) validando los parámetros óptimos de presión y voltaje.



Nota: Ajuste del modelo que confirma la conFiguración óptima final para presión (3.43) y voltaje (37), obteniendo la máxima reducción posible en el sobrecontenido de cobre. Elaboración propia.

Figura 43

Resultados del Diseño de Experimentos (DOE 1.5) para la confirmación final del modelo estadístico



Fit Quadratic Model for Peso
Report Card

Check	Status	Description
Blocks		Blocks are not significant. Because the runs in each block are typically performed at different times, this result indicates that there is no evidence of differences in the experimental conditions over time.
Unusual Data		2 data points have large residuals and are not well fit by the model. These points are marked in red on the Diagnostic Report. You can hover over a point or use Minitab's brushing feature to identify the worksheet rows. Because unusual data can have a strong influence on the results, try to identify the cause for their unusual nature. Correct any data entry or measurement errors. Consider performing trials associated with special causes again and redoing the analysis.
Randomization		When you create a designed experiment, Minitab automatically randomizes the order of the experimental runs. Randomization balances the effect of uncontrollable conditions, such as changes to materials or personnel, and reduces the chance that these conditions will bias the results. If you did not perform the runs in random order, consider repeating the experiment.
Next Steps		Evaluate the optimal solutions in the Summary Report and the Prediction and Optimization Report, which show factor settings that optimize Peso. The Prediction and Optimization Report also shows alternative solutions that are nearly optimal. If the settings from the optimal solution or one of the alternative solutions are adequate, you should perform 20-30 confirmation runs using those settings to verify the solution. If the solutions do not meet your goals, you may need to run another experiment using different factor settings. If necessary, get help to determine the appropriate next steps.

Nota: Gráfico que muestra los resultados obtenidos en la prueba final confirmatoria del modelo optimizado con las variables presión (3.43) y voltaje (37), asegurando la reducción estable del sobrecontenido de cobre en el cable 500 KCM. Elaboración propia.

Como conclusión, encontramos la combinación deseada para obtener el peso mínimo, que sería 3.43 de presión, con 37 de voltaje. Con esta combinación, tendríamos una reducción del sobrecontenido.

El valor de R^2 obtenido indica que el modelo explica de manera significativa la variabilidad de los datos, lo cual valida la calidad del ajuste. Este resultado permite considerar el estudio como satisfactorio y brinda sustento estadístico para avanzar hacia la fase de control del proceso.

Además, se realizaron pruebas para verificar el cumplimiento de estos valores, las cuales fueron satisfactorias y se encontraban dentro del rango esperado. En la etapa de control, realizaremos un análisis futuro para confirmar dichas modificaciones, donde se anticipa la reducción esperada.

5.3. Impacto de la intervención en la organización

La intervención realizada en el proceso de trefilado del cable 500 KCM generó un impacto positivo y medible en la organización, tanto en términos de eficiencia operativa como de control de costos. En esta sección se presentan los resultados más relevantes que evidencian la efectividad de la estrategia implementada, sustentados en datos cuantitativos obtenidos del sistema de medición y registros operativos.

La Tabla 16 resume los principales indicadores antes y después de la intervención, destacando mejoras en la precisión de medición, cumplimiento normativo y reducción del sobrecontenido de cobre. Estos resultados no solo validan la intervención técnica, sino que también reflejan beneficios económicos y de calidad para la organización.

Tabla 16

Resumen comparativo de indicadores antes y después de la intervención

Indicador	Antes	Después	Impacto estimado
% sobrecontenido de cobre	0.25%	0.14%	Ahorro total estimado $105,000
Índice Ppk	0.32	0.34	Mejor distribución para entregar menor contenido
Error en medición	19%	12%	Mayor precisión en medición
Cumplimiento con norma ANCE	Parcial	Total	Conformidad normativa asegurada

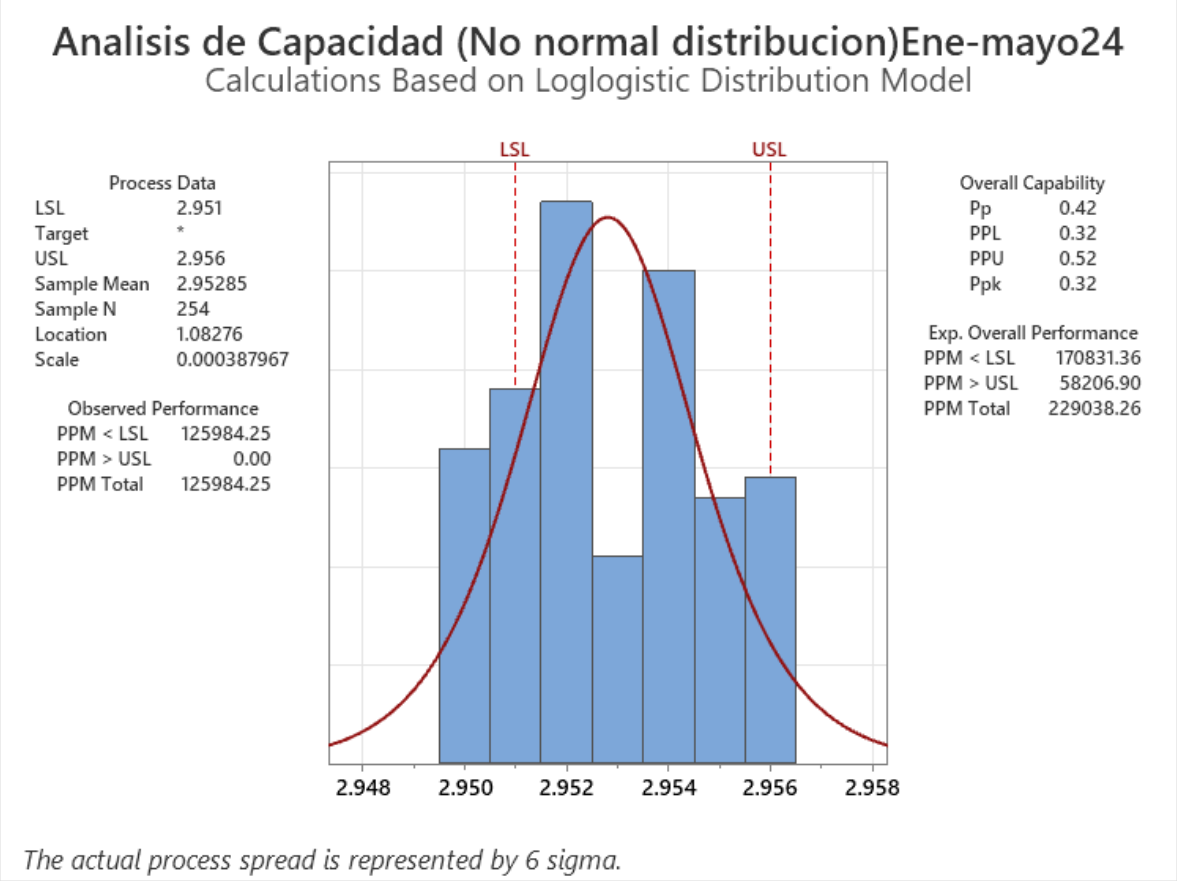
Nota: Elaboración propia (2025) con base en resultados de MiniTab y registros internos de la organización.

Impacto cuantitativo

Los principales indicadores de desempeño muestran mejoras en la reducción del sobrecontenido de cobre y optimización del proceso. A continuación, se presenta el análisis de capacidad en las Figuras 44 y 45, de los valores obtenidos antes y después de la intervención.

Figura 44

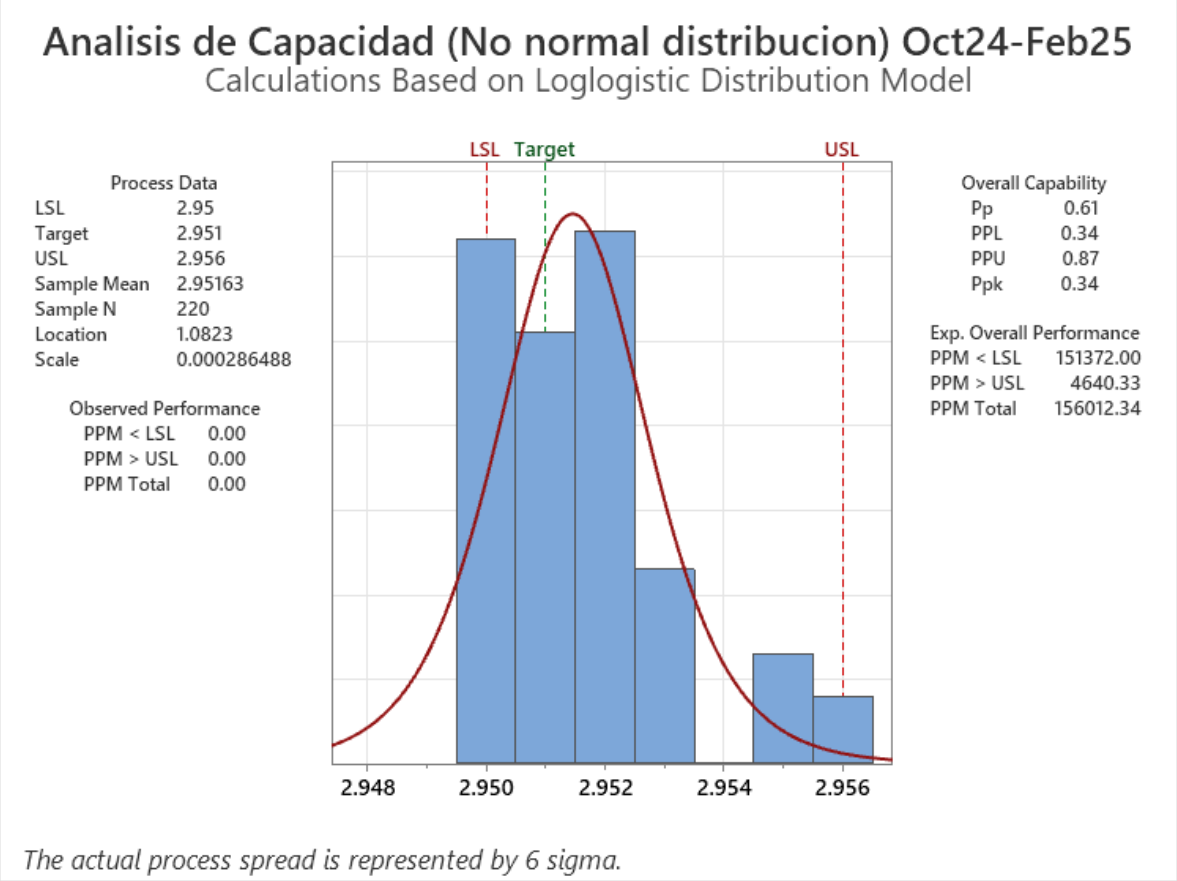
Análisis de capacidad antes



Nota: Datos obtenidos del sistema de la empresa, donde los primeros datos son de Enero24-Mayo24 antes de las mejoras en el DOE, este análisis es extraído de los resultados arrojados por MiniTab.

Figura 45

Análisis de capacidad después



Nota: Datos obtenidos del sistema de la empresa de Octubre24-Febrero25, este análisis es extraído de los resultados arrojados por MiniTab en una distribución loglogistic.

- Antes de la intervención (Ene–Mayo 24):
  PPM Total = 229,038.26
- Después de la intervención (Oct 24–Feb 25):
  PPM Total = 156,012.34

Resultado: Se redujo el número total de piezas fuera de especificación en un **31.87 %**.

PPM < LSL (piezas por debajo del mínimo)

- Antes: PPM < LSL = 170,831.36
- Después: PPM < LSL = 151,372.00

Resultado: Se redujo la cantidad de piezas por debajo del LSL en un **11.39 %**.

Los datos obtenidos en este análisis, presentados en las Figuras anteriores, muestran una comparación entre la situación inicial y los resultados tras la implementación de la mejora. Los valores iniciales fueron recopilados durante la etapa de medición, mientras que los datos posteriores corresponden al período de octubre de 2024 a febrero de 2025, reflejando el impacto de la intervención en el proceso.

A pesar de que los valores de capacidad aún son relativamente bajos, los resultados indican una mejora significativa. Esto se debe a que la distribución de los datos ahora se encuentra más alineada con la especificación esperada de 2.951 mm, lo que contribuye directamente a la reducción del sobrecontenido de cobre sin comprometer los parámetros de calidad.

Sin embargo, para garantizar una mayor estabilidad del proceso, se recomienda como actividad futura la implementación de mejoras adicionales orientadas a fortalecer la capacidad del proceso y aumentar el valor de Cpk y Ppk, asegurando así una mayor robustez y consistencia en la producción.

Impacto económico de la intervención

Esta mejora tiene, a su vez, un impacto económico considerable. Si bien la reducción lograda en el sobrecontenido de cobre fue de apenas **0.11%**, frente al objetivo de **0.13%**, esta mejora técnica aparentemente marginal representa una **ganancia económica significativa** para la organización.

De acuerdo con los registros de producción y costos de cobre en los últimos cinco meses (octubre 2024 a febrero 2025), el efecto acumulado de esta reducción ha generado un **ahorro estimado total de aproximadamente $105,000 MXN**. Esta

cifra se obtiene al aplicar el 0.11% de reducción sobre los costos de producción mensuales en función de los kilogramos producidos y el precio promedio del cobre durante ese periodo.

La Tabla 17 resume los beneficios económicos obtenidos:

Tabla 17

Beneficios económicos obtenidos

Mes	Producción (toneladas)	Costo mensual estimado KG/Cu	Ahorro estimado (miles de $)
Oct-24	112.60	$233.98	21.1
Nov-24	71.14	$234.32	13.3
Dic-24	184.72	$231.97	34.3
Ene-25	101.00	$236.26	19.1
Feb-25	85.84	$252.35	17.3
Total	**555.30**	-	$100,000

Nota. Cifras aproximadas y confidenciales. Elaboración propia con base en datos internos de producción y contabilidad. Elaboración propia (2025).

El cálculo económico se realizó tomando en cuenta la diferencia porcentual del cobre consumido antes y después de la intervención, multiplicado por el precio promedio del cobre registrado durante el periodo de análisis, asegurando así la precisión y representatividad de la estimación financiera presentada.

Estos resultados refuerzan la importancia de intervenir variables críticas en el proceso de trefilado como la presión y el voltaje, y validan el uso de metodologías estadísticas robustas como el Diseño de Experimentos (DOE) para generar mejoras sostenibles y medibles.

Impacto cualitativo

Además de los resultados cuantitativos, se han observado mejoras operativas y organizacionales que reflejan la efectividad de la intervención. Entre los cambios más relevantes destacan:

- **Mayor estabilidad en la operación**, gracias a la estandarización de los parámetros de trefilado.
- **Mejor percepción del personal sobre el control del proceso**, debido a la capacitación implementada.
- **Optimización en la toma de decisiones basada en datos estadísticos**, lo que facilita el monitoreo del desempeño del proceso.

Relación con los objetivos de la organización

La estrategia de intervención no solo ha permitido una reducción en desperdicios y costos operativos, sino que también se alinea con los objetivos estratégicos de la organización, que buscan:

- Optimización del uso de materia prima y reducción de desperdicio.
- Incremento en la eficiencia operativa mediante el control de variables críticas.
- Sostenibilidad de las mejoras mediante la implementación de controles estadísticos y capacitación del personal.

Conclusión del impacto

La intervención ejecutada en el proceso de trefilado permitió una reducción efectiva del sobrecontenido promedio de cobre, al pasar de un valor inicial de 0.25 % a 0.14 %. Esta mejora representa una disminución absoluta de 0.11 puntos porcentuales, generando un ahorro tangible y recurrente para la organización. Como se observa en la Tabla 18, esta reducción se traduce en un ahorro mensual estimado superior a los $20,000 MXN, lo cual fortalece la rentabilidad operativa y apoya la sostenibilidad del sistema productivo en el largo plazo (DeFeo, 2017).

Tabla 18

Comparación antes y después de la intervención

Indicador	Antes de la intervención	Después de la intervención
Sobrecontenido de cobre (%)	0.25%	0.14%
Ahorro mensual estimado (MXN)	$0	$20,000+

Nota: Elaboración propia con base en resultados de MiniTab y registros internos.

Con base en la evidencia obtenida, se concluye que la intervención ha sido exitosa en la reducción del sobrecontenido de cobre, logrando un impacto positivo en la eficiencia del proceso y en la rentabilidad de la organización. La implementación de controles estadísticos y la optimización de condiciones operativas han permitido que los resultados sean sostenibles como lo sugiere la literatura especializada en SPC aplicada a mejora continua (Gejdoš, 2015).

5.4. Control y sostenibilidad de la mejora

La implementación del cambio incluye un conjunto de controles robustos para asegurar la sostenibilidad de las mejoras. Estos controles consisten en el uso de controles visuales en las estaciones clave, dispositivos Poka-Yoke para prevenir errores, un programa de TPM para mantener en óptimas condiciones los equipos críticos, procedimientos claramente estandarizados, documentación actualizada, capacitación continua del personal involucrado, gestión sistemática y seguimiento constante de los procesos críticos, y un plan detallado de control que establece parámetros operativos claramente definidos para el proceso mejorado.

Para garantizar que las mejoras implementadas se mantengan a largo plazo, se diseñó un plan de control basado en el ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act).

La implementación del ciclo PDCA refuerza la sostenibilidad del cambio mediante un enfoque estructurado de mejora continua, alineado a los principios de gestión de calidad total (George, 2005b); esta herramienta permite establecer un sistema

estructurado de seguimiento, estandarización y mejora continua, fortaleciendo la sostenibilidad de los resultados obtenidos durante la intervención.

La planificación fue realizada con base en las condiciones reales del proceso y alineada con los principios de mejora continúa promovidos por la metodología Lean Six Sigma. Cada fase del ciclo PDCA se traduce en acciones específicas que permiten consolidar las mejoras, dar seguimiento a indicadores clave y generar oportunidades de innovación a futuro.

A continuación, en la Tabla 19 se muestra la síntesis del plan:

Tabla 19

Plan de sostenibilidad de la mejora mediante PDCA.

Fase	Objetivo	Acciones Clave	Impacto Esperado
Plan (Planificar)	Asegurar la sostenibilidad de las mejoras en la reducción del sobrecontenido de cobre.	Formalizar procedimientos, capacitar personal, auditar procesos, monitorear KPIs.	Optimización de costos, mejora de calidad, reducción de desperdicios.
Do (Ejecutar)	Aplicar los nuevos parámetros de control en la producción y evaluar métricas en tiempo real.	Aplicar nuevos controles, seguimiento con ERP y Minitab, reuniones quincenales.	Mayor eficiencia operativa, reducción de sobrecontenido, mejoras en control.
Check (Verificar)	Evaluar impacto en estrategia organizacional, medir adherencia y recopilar retroalimentación.	Comparar indicadores, medir cumplimiento, identificar oportunidades de mejora.	Asegurar cumplimiento normativo, optimizar uso de materiales, fortalecer estrategia.
Act (Actuar)	Automatizar monitoreo, desarrollar modelos predictivos y	Implementar sensores avanzados, desarrollar inteligencia	Sostenibilidad de mejoras, innovación en manufactura,

	expandir la metodología.	artificial, expandir mejoras.	posicionamiento competitivo.

Nota: Elaboración propia con base en la estrategia de control definida tras la intervención.

Entre los principales resultados esperados se encuentran:

5.4.1. Procedimientos estandarizados

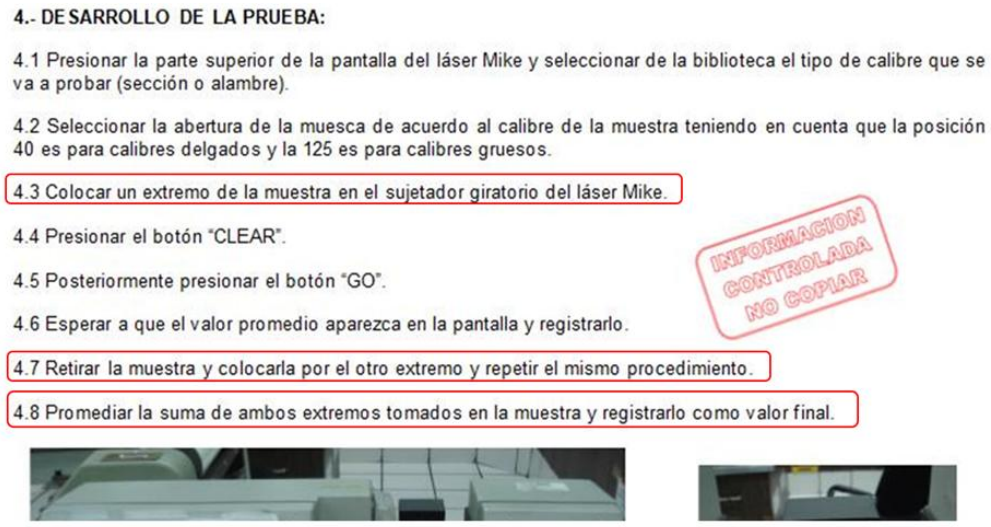
Con el objetivo de controlar el contenido de cobre y asegurar su registro sistemático, se implementaron procedimientos estandarizados dentro del sistema de gestión de la compañía.

Como parte de esta intervención, se realizaron ajustes tanto en las condiciones de operación como en el método de prueba utilizado en el sistema de medición. Estos cambios se integraron formalmente al sistema de gestión y se complementaron con un programa de capacitación continua para asegurar su correcta implementación y sostenimiento.

Uno de los principales ajustes consistió en la modificación del método de prueba aplicado a la medición de diámetros, tal como se presenta en la Figura 46::

Figura 46

Método de prueba para los diámetros, modificado



Nota: Imagen del después, obtenida del método de prueba de la compañía, solo mostrando la parte esencial, ya que, por temas de confidencialidad, no se incluye mas parte del documento.

El segundo ajuste se realizó sobre el documento que especifica las condiciones de operación en el área de trefilado. Esta nueva versión, ilustrada en la Figura 47, estará disponible en todo momento para el personal operativo, mediante las computadoras asignadas a cada máquina, con el fin de garantizar el acceso inmediato a la información actualizada.

Figura 47

Documento interno de las condiciones de operación del área de trefilado

CONDICIONES DE OPERACIÓN ESTIRADO

DEPARTAMENTO: TÉCNICO

CLAVE: MT-TE-010

CALIBRE AWG Y KCM	BOBINAS DE RECIBO Y LONGITUD DE LLENADO				SELECTOR NUCLEO DE BOBINA			VELOCIDAD PARA CAMBIO DE BOBINA	VELOCIDAD MAXIMA	SELECT-OR VEL.	VOLTAJE PARA EL RECOCIDO ± 2 VOLTS		PRESION DEL DANCER	POSICION PALANCA DE VELOCIDADES		
SUAVE	600 LBS.	1000 LBS.	630 DIN	CESTA	600 LBS	1000 LBS	630 DIN	M / S	M / S	CAMBIO	V	TAP	+/- 1.0 KGS.	1	2	3

Nota: Este documento interno, fue donde se colocaron las nuevas condiciones de operación, que estarán disponibles en todo momento para el personal del área.

5.4.2. Capacitación continua

Como parte del plan de sostenimiento de las mejoras implementadas, se desarrolló un programa de capacitación dirigido al personal de manufactura y calidad, enfocado en el monitoreo de variables críticas del proceso. Para gestionar este esfuerzo, se diseñó una matriz de capacitación en coordinación con el área de Recursos Humanos, que forma parte del sistema de gestión de calidad y busca garantizar la correcta adopción y mantenimiento de los cambios realizados.

La Figura 48 presenta dicha matriz, donde se establecen las competencias clave, los responsables de formación, los indicadores de éxito y el calendario de capacitación planificado desde febrero hasta diciembre de 2025.

Figura 48

Matriz de Capacitación

Competencia a desarrollar	Responsable	Indicador de éxito	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Monitoreo de variables críticas	Área de Calidad	Resultados prueba R&R	■	■		■		■		■		■	
Uso de controles visuales	Supervisor Producción	Auditoría visual mensual	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Operación segura del equipo (TPM)	Área Mantenimiento	Índice de fallos o paros		■			■			■			■
Gestión de documentación actualizada	Área Técnica	Documentos actualizados y validados		■		■		■		■		■	
Capacitación en dispositivos Poka-Yoke	Área Técnica y Calidad	Número de errores detectados	■		■		■		■		■		■
Estandarización de procesos operativos	Producción y Calidad	Cumplimiento auditorías internas	■	■	■		■	■	■		■	■	■

Leyenda:

■ indica los meses durante los cuales se llevará a cabo la capacitación.

Se recomienda realizar un seguimiento continuo cada trimestre para medir la efectividad y realizar ajustes necesarios.

Notas:

El diseño trimestral para algunas capacitaciones garantiza una constante actualización y reforzamiento.

La capacitación en **controles visuales y estandarización** es mensual debido a la alta frecuencia requerida para mantener la estabilidad operativa.

Las formaciones sobre **seguridad en TPM** y **gestión documental** son bimestrales y trimestrales respectivamente, equilibrando efectividad con tiempo disponible.

Poka-Yoke se capacita en intervalos alternados para permitir revisión y aplicación práctica entre sesiones.

Nota: La matriz muestra las competencias clave, responsables, indicadores de éxito y el calendario planificado de capacitación desde febrero hasta diciembre de 2025, para asegurar el sostenimiento de las mejoras implementadas. Elaboración propia (2025).

5.4.3. Plan de control

Como parte de la fase de control dentro de la metodología DMAIC, se implementó un plan estructurado con base en el ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act), con el objetivo de garantizar la sostenibilidad de los resultados obtenidos durante la intervención. Este plan integra mecanismos técnicos, operativos y formativos orientados a mantener la estabilidad del proceso y prevenir la reincidencia de las desviaciones observadas.

La Figura 49 presenta una visión general del plan de control diseñado, que considera acciones específicas en torno a medición, operación estandarizada y detección automática de desviaciones.

Figura 49

Plan de control

Procedimiento de diseño	Tipo (P/P)	Característica / Variable	Clasificación SC/CC/-	Especificación (LSL – USL)	Límites de control (LCL – UCL)	Controles implementados			Plan de reacción	
						Método / Equipo de medición	Tamaño / Frecuencia de muestreo	Registro de inspección	Responsable	Acción correctiva
Control del diámetro del cable	Producto	Diámetro del cable	SC	2.951 – 2.956 mm	2.953 ± 0.002 mm	Medición láser en línea	100% en línea	Bitácora SCADA	Supervisor / Calidad	Detener línea, notificar técnica/calidad, ajustar parámetros y documentar.
Control del desgaste de dados	Proceso	Desgaste físico de los dados	-	≤ desgaste permitido	Según ficha técnica	Inspección visual y medición	Intervalos definidos	Calendario de mantenimiento	Mantenimiento	Reemplazo o mantenimiento según desgaste, actualizar calendario y capacitación.
Gestión de condiciones operativas	Proceso	Condiciones de operación	-	Parámetros establecidos	Dentro de especificaciones	Procedimiento estandarizado	Revisión mensual	Procedimiento operativo	Supervisor / Calidad	Acción correctiva, actualización del procedimiento y auditoría mensual.
Prevención de errores en proceso	Proceso	Errores humanos en la supervisión	-	N/A	N/A	Poka-Yoke / Panel visual	Monitoreo continuo	Panel de control visual	Técnico / Calidad	Alerta visual y acción inmediata ante desviación detectada.

Nota: Elaboración propia (2025).

Uno de los elementos clave del plan fue la integración de un sistema de medición en línea para el diámetro del cable, representado en la Figura 50. Este equipo permite monitorear en tiempo real las variaciones dimensionales del producto, mejorando significativamente la capacidad de respuesta ante desviaciones y asegurando una detección oportuna de condiciones fuera de especificación.

Figura 50

Medidor laser Zumbach

Nota: Este medidor laser fue el que se integró en el área de trefilado para el seguimiento a mediciones en línea en tiempo real. Imagen obtenida del proveedor: https://zumbach.com/es/productos/odac/

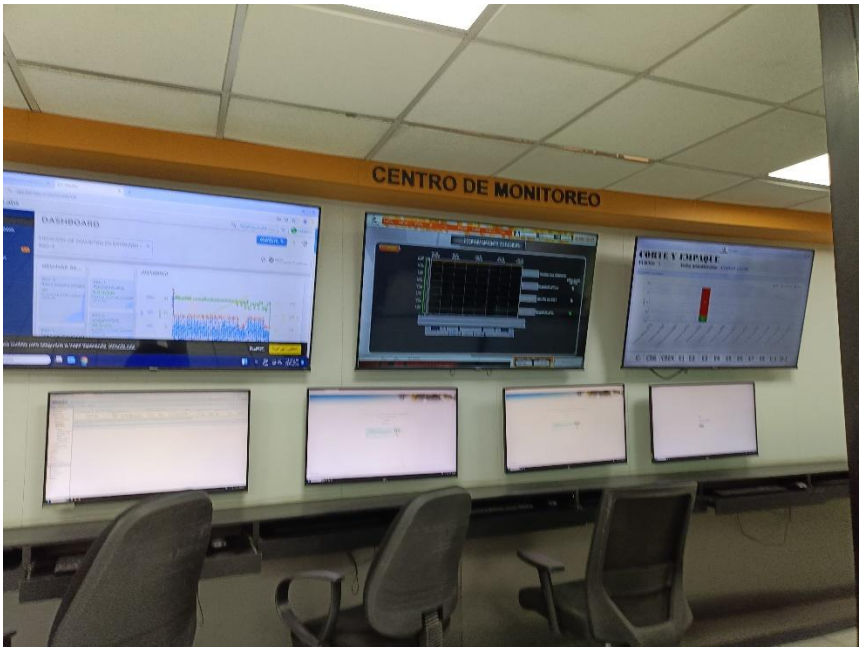
Asimismo, se incorporaron controles adicionales en distintas áreas clave del proceso. En primer lugar, se reforzó el **control del desgaste de dados**, integrándolo como parte del contenido del plan de capacitación y alineándolo con los lineamientos de operación segura bajo la filosofía TPM (Mantenimiento Productivo Total).

En segundo lugar, se formalizó la gestión de **condiciones operativas críticas**, las cuales ya habían sido documentadas y mejoradas como parte de la intervención. Estos cambios están representados en la Figura 44 y fueron también integrados al plan de capacitación como parte de la estandarización de procesos.

Adicionalmente, se implementó un sistema **Poka-Yoke** mediante el mismo **detector de diámetro en línea** Zumbach, utilizado como barrera para prevenir errores en tiempo real. Para garantizar el funcionamiento adecuado de este sistema, se habilitó un centro de monitoreo en el área de producción, desde donde se visualizan continuamente los datos generados por el equipo, incluyendo gráficos de control actualizados en tiempo real. Este entorno se presenta en la Figura 51.

Figura 51

Centro de monitoreo de la compañía



Nota: En este centro de monitoreo se presentan diferentes gráficos de control, donde en una de las pantallas, está el grafico del medidor laser en línea. Elaboración propia (2025).

Este conjunto de acciones no solo responde al componente final de la metodología DMAIC, sino que refleja el compromiso organizacional con la sostenibilidad de los resultados y la consolidación de una cultura de mejora continua. A través de la implementación de este sistema estructurado, se busca asegurar que las mejoras no se limiten a soluciones puntuales, sino que se mantengan como prácticas integradas en la operación cotidiana.

El enfoque adoptado está alineado con los principios propuestos por Deming (2018), quien destaca el ciclo PDCA como una herramienta esencial para impulsar una transformación efectiva en la gestión de calidad. Al estructurar el control bajo este marco, se establecen condiciones operativas óptimas que contribuyen directamente a la reducción del sobrecontenido de cobre.

En su conjunto, este plan de control constituye una guía para el desarrollo de futuras fases del proyecto y nuevas iniciativas organizacionales. La experiencia adquirida en esta intervención sienta las bases para diseñar estrategias más robustas, alineadas con los desafíos actuales del sector manufacturero y centradas en la mejora continua.

CAPÍTULO 6

Discusión final

Esta intervención, desarrollada bajo la metodología DMAIC de Lean Six Sigma, permitió abordar de manera integral la problemática del sobrecontenido de cobre en el proceso de trefilado del cable 500 KCM. A partir del diagnóstico profundo, se identificaron y validaron variables críticas del proceso que inciden en la variabilidad del diámetro del conductor, particularmente la presión (tensión aplicada) y el voltaje de recocido. A través del uso de herramientas estadísticas como el Diseño de Experimentos (DOE) y el análisis de capacidad del proceso, se diseñaron e implementaron soluciones que permitieron alcanzar una mejora medible y sostenible.

Desde una perspectiva disciplinaria, el proyecto demuestra la efectividad de Lean Six Sigma como marco metodológico para resolver problemas complejos en procesos industriales. El uso de herramientas como SIPOC, CTQ, Ishikawa, Pareto, R&R y SPC, permitió no solo identificar la causa raíz del problema, sino también validar cuantitativamente la eficacia de las acciones implementadas. Esta experiencia reafirma la importancia de integrar datos, procesos y personas dentro de un enfoque sistémico de mejora continua (Montgomery, 2019; George, 2005).

Estos resultados validan los principios del control estadístico de procesos propuestos por Montgomery (2020), quien sostiene que la variabilidad en procesos críticos puede ser significativamente reducida cuando se identifican y controlan las variables más influyentes. En el caso de esta intervención, la mejora en los índices de capacidad confirma que los ajustes operativos realizados permitieron estabilizar el proceso dentro de los límites de especificación establecidos por la normativa ANCE (2018, 2019).

Asimismo, la fase de mejora del ciclo DMAIC reafirma lo planteado por George (2005), al demostrar que el uso de herramientas estadísticas como el Diseño de Experimentos (DOE) puede generar soluciones robustas, medibles y sostenibles. El impacto económico obtenido evidencia que la metodología Lean Six Sigma no solo mejora la calidad del proceso, sino que también contribuye directamente a la rentabilidad de la organización.

En términos organizacionales, los resultados obtenidos reflejan un impacto económico directo con un ahorro estimado de más de $100,000 pesos en un periodo de cinco meses, producto de una reducción del 0.11% en el sobrecontenido de cobre. Aunque el valor porcentual parece marginal, su efecto sobre el volumen de producción y los costos de materia prima resulta significativo, particularmente en un contexto donde el precio del cobre es volátil y representa uno de los principales componentes del costo de fabricación (Banco Mundial, 2023).

A nivel operativo, se logró una mayor estandarización de los parámetros de trefilado, una mejora en la precisión del sistema de medición y una mayor conciencia del personal sobre la importancia del control de procesos. Este último aspecto destaca la dimensión humana de la intervención, donde la capacitación y la apropiación del cambio fueron claves para la sostenibilidad de los resultados, alineándose con los principios de la mejora continua y el respeto por las personas promovidos por la filosofía Lean (Ballé & Ballé, 2014).

Desde una perspectiva profesional, esta experiencia representa un hito en mi formación como ingeniero de calidad. No solo fortaleció mis competencias técnicas en análisis estadístico, gestión de procesos y diseño de experimentos, sino que también me permitió desarrollar habilidades de liderazgo, comunicación interdepartamental y gestión del cambio. El proyecto fue, además, un ejercicio real de aplicación de conocimientos adquiridos durante la maestría, integrando teoría, práctica y toma de decisiones estratégicas con impacto tangible.

Entre las limitaciones del estudio se destacan la capacidad técnica limitada de los equipos de medición, restricciones operativas para realizar cambios más profundos en otras áreas del proceso, y la imposibilidad de evaluar completamente otras etapas como el cableado. Estas limitaciones sugieren la necesidad de futuros estudios complementarios.

En conclusión, el proyecto evidenció cómo una intervención metodológicamente estructurada, respaldada por datos y centrada en la mejora de procesos, puede generar beneficios económicos, operativos y organizacionales sostenibles.

Los resultados alcanzados en este proyecto no solo confirman la efectividad del método DMAIC para la reducción del sobrecontenido, sino que también proporcionan un modelo replicable para futuras intervenciones en procesos similares dentro de la organización, incrementando así su potencial impacto a nivel estratégico y operativo.

Además, se reafirma la importancia de la calidad como una disciplina estratégica en la industria, capaz de articular tecnología, talento y conocimiento para resolver problemas de alto impacto. Esta experiencia refuerza mi compromiso con la excelencia operativa y con la mejora continua como pilares fundamentales de mi desarrollo profesional.

6.1. Relevancia y trascendencia disciplinaria de la estrategia de intervención

La intervención desarrollada en este Trabajo de Obtención de Grado representa un ejercicio disciplinario riguroso, en el que convergen fundamentos teóricos, metodológicos y técnicos propios del ámbito de la ingeniería y la gestión de la calidad. Mediante la aplicación estructurada del ciclo DMAIC de la metodología Lean Six Sigma, se abordó una problemática real con implicaciones económicas, operativas y normativas dentro de la organización. Esta aproximación permitió traducir principios abstractos de mejora continua en acciones concretas, medibles y

sostenibles, lo cual refuerza la aplicabilidad del enfoque en contextos industriales complejos (George, 2005).

En términos de contribución al conocimiento, el proyecto aporta evidencia empírica sobre la aplicación de herramientas estadísticas avanzadas como el Diseño de Experimentos (DOE), el análisis de capacidad de procesos y los estudios R&R en contextos reales de manufactura donde la variabilidad del proceso y las especificaciones normativas representan desafíos técnicos considerables. Si bien dichas herramientas han sido ampliamente documentadas en la literatura (Montgomery, 2019; George, 2005), su aplicación específica en el control del sobrecontenido de cobre en la fabricación de cable eléctrico representa un enfoque novedoso en el entorno nacional.

Asimismo, la intervención se distingue por su originalidad metodológica, ya que integra instrumentos propios de la gestión de calidad con estrategias operativas y decisiones técnicas de producción, estableciendo una sinergia entre áreas funcionales usualmente fragmentadas. En este sentido, la incorporación de eventos Kaizen, la estandarización de métodos de medición y la capacitación del personal evidencian una estrategia sistémica y multidimensional, orientada no solo a resolver un problema técnico, sino a fortalecer la cultura de calidad dentro de la organización (Ballé & Ballé, 2014).

El significado y trascendencia de esta intervención se manifiesta en su impacto directo en la toma de decisiones organizacionales, específicamente en lo relativo a la optimización del consumo de materia prima, la mejora en la precisión de los sistemas de medición y la estandarización de parámetros operativos. Esto se traduce en beneficios económicos concretos, pero también en una mejora sustantiva de las capacidades internas para gestionar la variabilidad y garantizar la conformidad con normativas como las NMX-J-010-1-ANCE-2018 y NMX-J-012-ANCE-2019, que establecen los límites de variación aceptables para el diámetro de conductores eléctricos de baja tensión. En consecuencia, la organización se

posiciona mejor frente a los retos del mercado y fortalece su competitividad mediante la gestión efectiva de procesos críticos.

Desde una perspectiva más amplia, la intervención también presenta relevancia práctica y social, ya que promueve el uso racional de recursos no renovables como el cobre, en línea con los principios de sostenibilidad industrial (International Copper Association, 2022). Esta acción, aunque centrada en un proceso interno, contribuye al objetivo general de reducir el impacto ambiental de las operaciones industriales, generando un doble beneficio: económico y ecológico. Además, el enfoque en la formación del personal técnico y operativo refuerza las competencias organizacionales, generando valor humano que trasciende el proyecto específico.

En definitiva, esta estrategia de intervención constituye una aportación relevante al campo de la calidad industrial por su enfoque práctico, replicabilidad, fundamentación metodológica y capacidad para articular teoría y acción. No solo permite resolver una problemática operativa, sino que abre nuevas líneas de trabajo vinculadas al análisis de procesos críticos, la cultura organizacional de mejora continua y la sostenibilidad del desempeño industrial. Además de su impacto organizacional, esta intervención representa una contribución al conocimiento aplicado en ingeniería de calidad, al demostrar cómo herramientas como el DOE, el análisis de capacidad y el AMEF pueden articularse en un enfoque sistémico de mejora continua (Pyzdek & Keller, 2019).

Los resultados alcanzados en este proyecto no solo evidencian mejoras locales en el proceso de trefilado, sino que también ofrecen un modelo metodológico replicable en otros procesos de manufactura que presenten problemas de sobreconsumo de materiales críticos, fortaleciendo así las prácticas de mejora continua en el sector industrial.

6.2. Aportes personales y profesionales

La realización de esta intervención representó una experiencia de aprendizaje profundamente significativa, tanto a nivel personal como profesional. Desde las primeras etapas del proyecto, fue necesario desarrollar una comprensión técnica detallada del proceso de trefilado, lo cual implicó el estudio de variables críticas como la presión, el voltaje de recocido y el desgaste de dados. Esta necesidad de inmersión técnica derivó en el fortalecimiento de competencias específicas en ingeniería de procesos, así como en la construcción de una visión sistémica del entorno productivo, indispensable para la identificación e implementación de soluciones integrales.

Uno de los principales aportes personales fue la capacidad de integrar herramientas de análisis estadístico con conocimientos operativos. El uso de métodos como el Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF), el análisis de capacidad (Cpk, Ppk) y el Diseño de Experimentos (DOE), me permitió identificar relaciones causa-efecto en contextos de alta variabilidad, lo que fortaleció mi pensamiento analítico y crítico.

Desde una perspectiva profesional, esta intervención consolidó mi formación como ingeniero de calidad con orientación estratégica. Pude aplicar la metodología DMAIC de Lean Six Sigma en un entorno real, generando una mejora con impacto tangible en la rentabilidad del proceso y validando los beneficios de aplicar control estadístico de procesos para la toma de decisiones operativas. Esta experiencia reafirma la importancia del rol del ingeniero de calidad como agente de cambio en las organizaciones, capaz de liderar proyectos de mejora con fundamentos técnicos, estadísticos y metodológicos.

Además, el trabajo con diferentes áreas funcionales como calidad, producción e ingeniería me permitió desarrollar habilidades de gestión interdepartamental, liderazgo colaborativo y comunicación efectiva. Pude observar de cerca cómo las decisiones técnicas se alinean con la estrategia empresarial y cómo la mejora continua no es solo un proceso técnico, sino también un proceso humano.

Este proyecto también me permitió fortalecer competencias como la toma de decisiones basada en datos, la gestión del cambio, y el diseño de estrategias sostenibles, habilidades que considero fundamentales para mi crecimiento profesional futuro. La posibilidad de ver una mejora implementada, medida y sostenida representa un logro que trasciende lo académico y confirma mi compromiso con la excelencia operativa.

Esta experiencia refuerza mi compromiso con la mejora continua y fortalece mi perfil como ingeniero capaz de liderar transformaciones basadas en datos y análisis técnico riguroso.

6.3. Aspectos de mejora para futuras intervenciones

A pesar de los logros obtenidos en esta intervención, es importante reconocer que todo proceso de mejora continua deja oportunidades abiertas para su fortalecimiento. Con base en la experiencia adquirida y los resultados alcanzados, se identifican diversos aspectos que podrían optimizarse en futuras implementaciones, tanto a nivel técnico como organizacional.

Una de las principales oportunidades consiste en extender el análisis hacia otros calibres de cable, especialmente aquellos que, aunque no sean los más producidos, pueden presentar desviaciones relevantes en el contenido de cobre. La aplicación de la metodología DMAIC y herramientas estadísticas como el Diseño de Experimentos (DOE) permitiría replicar la estrategia de mejora y obtener beneficios adicionales en reducción de desperdicio.

Asimismo, se sugiere evaluar otros procesos relacionados como el cableado o extrusión, los cuales también pueden influir en la variabilidad del contenido de cobre. Una intervención integral que abarque toda la cadena de valor podría fortalecer aún más los controles de calidad y generar mejoras transversales.

Desde el punto de vista organizacional, se recomienda ampliar y sistematizar los programas de capacitación técnica, con el objetivo de asegurar que todos los operadores, inspectores y técnicos comprendan a profundidad las condiciones de operación estandarizadas y los nuevos procedimientos de medición. La creación de módulos de formación continua permitiría sostener las mejoras logradas y fomentar una cultura de calidad en todos los niveles.

Adicionalmente, fortalecer el sistema de documentación interna con base en lo aprendido durante esta intervención asegurará que las lecciones, modificaciones y resultados obtenidos se mantengan disponibles y sean reutilizables en futuras iniciativas de mejora.

Finalmente, se plantea como recomendación consolidar el uso del ciclo PDCA como herramienta de seguimiento periódico a los parámetros críticos del proceso. Este enfoque asegurará que las mejoras implementadas no sean acciones puntuales, sino parte de una estrategia estructurada de control y mejora continua que pueda sostenerse y replicarse en el tiempo.

CONCLUSIONES

La intervención realizada logró una reducción significativa en el sobrecontenido de cobre del cable 500 KCM, pasando de 0.25 % a 0.14 %. Este resultado valida la eficacia del enfoque aplicado, generando beneficios operativos y económicos para la organización. La mejora se sustentó en la identificación de variables críticas como el voltaje de recocido y la presión aplicada, las cuales fueron analizadas mediante herramientas estadísticas como DOE, SPC, análisis de capacidad y estudios R&R. Estos instrumentos confirmaron no solo una disminución en el desperdicio de materia prima, sino también un incremento en la estabilidad del proceso y la confiabilidad del sistema de medición.

La intervención permitió estandarizar parámetros clave y consolidar un sistema de control sustentado en datos. Esto facilitó el uso de monitoreo digital, controles visuales y buenas prácticas que pueden replicarse en otras líneas de producción. Además de los beneficios cuantitativos, se promovió una transformación organizacional: el personal adquirió mayor conciencia sobre el proceso, se fortaleció la cultura de mejora continua y se mejoró la toma de decisiones basada en evidencia.

Desde el punto de vista metodológico, este proyecto demuestra la solidez del enfoque DMAIC como estrategia integral para resolver problemas complejos. La articulación de herramientas como SIPOC, AMEF, SPC y DOE permitió traducir la teoría en una solución adaptada al contexto industrial real, evidenciando el potencial de Lean Six Sigma para lograr mejoras sostenibles y rentables sin comprometer la conformidad normativa (George, 2005; Montgomery, 2020; Pyzdek & Keller, 2019).

Entre las limitaciones identificadas se encuentran ciertas restricciones en el sistema de medición, la imposibilidad de intervenir otras etapas del proceso (como el cableado) y la limitada capacidad técnica de los equipos. Estas condiciones abren

la posibilidad de futuras intervenciones enfocadas en modernización tecnológica, sensores inteligentes y automatización para una evolución hacia la industria 4.0. También se recomienda mejorar la robustez de los indicadores de desempeño y mantener el plan de control diseñado para sostener los resultados obtenidos a largo plazo.

En términos generales, esta experiencia representa una aplicación rigurosa de las metodologías de mejora continua en un entorno real de manufactura, aportando valor técnico, organizacional y disciplinario. El trabajo no solo fortaleció mis capacidades profesionales, sino que también sentó las bases para intervenciones futuras, consolidando una cultura operativa orientada a la excelencia.

BIBLIOGRAFÍA

AIAG. (2010). *Measurement Systems Analysis*. Automotive Industry Action Group.

Antony, J., Snee, R., & Hoerl, R. (2020). Lean Six Sigma: Yesterday, today and tomorrow. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *37*(1), 159–184. https://doi.org/10.1108/IJQRM-03-2019-0090

Ashrafizadeh, S. A., & Tan, Z. (2018). *Process and Process Variable*. Springer.

Asociación de Normalización y Certificación A.C. (ANCE). (2018). *NMX-J-010-1-ANCE-2018: Conductores-Conductores con aislamiento a base de policloruro de vinilo con designaciones internacionales hasta 600 V-Especificaciones*. https://www.ance.org.mx/Ance/

Asociación de Normalización y Certificación A.C. (ANCE). (2019). *NMX-J-012-ANCE-2019: Conductores-Conductores de cobre con cableado concéntrico para usos eléctricos-Especificaciones*. https://www.ance.org.mx/Ance/

International Copper Association. (2022). *Reducción de pérdidas de cobre en la industria*. https://www.copper.org

Ballé, M., & Ballé, F. (2014). *Lead with respect*. Lean Enterprise Institute.

Banco Mundial. (2023). *Precios de los metales básicos: Perspectivas y análisis*. https://www.worldbank.org/es/research/commodity-markets

Brue, G. (2002). *Six Sigma for Managers*. McGraw-Hill.

CEPAL. (2005). *Marco lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5607/S057518_es.pdf

Checkland, P. (2008). *Soft systems methodology: A 30-year retrospective*. Wiley.

DeFeo, J. A. (2017). *Juran's Quality Handbook: The Complete Guide to Performance Excellence* (7th ed.). McGraw-Hill Education.

Deming, W. E. (2018). *Out of the Crisis*. The MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/11457.001.0001

Feigenbaum, A. V. (1991). *Total Quality Control, Revised* (40th Anniversary Edition, Vol. 1). McGraw-Hill Companies.

García-Alvarado, M., Rodríguez-Ruiz, D., & Morales-Hernández, L. (2021). Optimización de procesos de trefilado mediante control estadístico de procesos. *Revista de Ingeniería Industrial Aplicada*, *13*(2), 33–40.

Gejdos, P. (2015). Continuous Quality Improvement by Statistical Process Control. *ScienceDirect*.

George, M. L. (2005). *The Lean Six Sigma Pocket Toolbook*. McGraw-Hill.

Hiatt, J. (2006). *ADKAR: A model for change in business, government and our community*. Prosci Learning Center Publications.

Huerta, D. S. (2020). *Análisis FODA o DAFO*. Bubok.

Imai, M. (1986). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill.

Ishikawa, K. (1994). *Introducción al control de la calidad*. Ediciones Díaz de Santos.

Iyer, R. (2021). *The Art of Creating Pareto Analysis*. Independently published.

Khim, I. (2023). *SWOT Analysis: Drive Business Growth Through Strategic Planning*. Independently published.

Kotter, J. P. (2012). *Leading change*. Harvard Business Review Press.

Liker, J. K. (2004). *The Toyota Way*. McGraw-Hill Education.

Martin, K., & Osterling, M. (2013). *Value Stream Mapping*. McGraw-Hill.

Martínez-Sánchez, C., & López-Guzmán, J. (2019). Normativas técnicas en la fabricación de conductores eléctricos: Una revisión crítica. *Revista Mexicana de Ingeniería*, *7*(1), 21–29.

Minitab. (2024). *Minitab Statistical Software*. https://www.minitab.com/en-us/support/minitab/minitab-software-updates/

Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (10th EMEA edition). Wiley.

Mozo, J. M. F. (2019). *Análisis del modo y efecto de fallas (AMEF)*.

Polhemus, N. W. (2017). *Process Capability Analysis: Estimating Quality*. Chapman and Hall/CRC.

Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2019). *The Six Sigma Handbook* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Rother, J. S. M. (2003). *Learning to See*. Lean Enterprise Institute.

Serrano, R. (2006). *Planificación estratégica y marco lógico: Guía para la gestión de proyectos sociales*. Ediciones Díaz de Santos.

Shook, J. (2008). *Managing to Learn*. Lean Enterprise Institute.

Ward, A. C., & Sobek, D. K. (2014). *Lean product and process development* (2nd ed.). Lean Enterprise Institute.

Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation* (1st Free Press ed., rev. updated). Free Press.

Wright, R. N. (2010). *Wire Technology: Process Engineering and Metallurgy*. Butterworth-Heinemann.

Zhu, Q., & Sarkis, J. (2022). Sustainable supply chain management and material efficiency: A circular economy perspective. *Journal of Cleaner Production*, *331*, 129767. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129767