



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

ENERGÍA ELÉCTRICA Y AGUA EN FÁBRICA DE COMPUESTOS POLIMÉRICOS: DIAGNÓSTICO DE USO Y EFICIENCIA

JORGE EDUARDO ESPINOSA CORREA

PROFESOR GUÍA: MAURICIO VARAS, PhD

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
MAGISTER EN GESTIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD

SANTIAGO – CHILE
2024



Universidad del Desarrollo
Facultad de Ingeniería

ENERGÍA ELÉCTRICA Y AGUA EN FÁBRICA DE COMPUESTOS POLIMÉRICOS: DIAGNÓSTICO DE USO Y EFICIENCIA

POR: JORGE EDUARDO ESPINOSA CORREA

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

Diego Rivera, PhD
Felipe Mora, PhD
Mauricio Varas, PhD

PROFESOR GUIA: Mauricio Varas, PhD

Para completar las exigencias del Grado de Magíster en gestión de la sustentabilidad

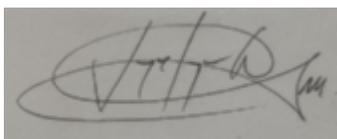
Enero, 2024

Santiago, Chile

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado: ENERGÍA ELÉCTRICA Y AGUA EN FÁBRICA DE COMPUESTOS POLIMÉRICOS: DIAGNÓSTICO DE USO Y EFICIENCIA, que presento a la Universidad del Desarrollo, es de mi autoría y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaro que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmo, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo (o parte de este), a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizo a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.



JORGE EDUARDO ESPINOSA CORREA

Dedicado a mi familia, especialmente a mi hija Aurora:

“En tu corazón encontrarás la valentía necesaria para superar cualquier miedo”

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Mariela y Aurora, sin su amor, apoyo y comprensión esto no sería posible.

Agradezco a mis padres por su esfuerzo y sacrificio para motivarme a seguir el camino de la universidad.

Agradezco a TOPCOLOR y a la familia Marzullo Varela por ser parte de mi carrera profesional y darme la posibilidad de desarrollar este estudio en su fábrica.

Agradezco a mis amigos y colegas, son mi principal fuente de inspiración.

Agradezco el conocimiento y experiencia entregado por los profesores de la universidad.

ENERGÍA ELÉCTRICA Y AGUA EN FÁBRICA DE COMPUESTOS POLIMÉRICOS: DIAGNÓSTICO DE USO Y EFICIENCIA

Jorge Eduardo Espinosa Correa
Bajo la supervisión del profesor Mauricio Varas, PhD

Resumen

La fábrica objeto de este estudio, mezcla polímeros plásticos con pigmentos y aditivos químicos para obtener distintos polímeros compuestos con aplicación en la industria del plástico. Durante el proceso de fabricación se utiliza energía eléctrica y agua. Actualmente esta fábrica no cuenta con un sistema de eficiencia energética por lo que no se controla ni existen planes para reducir el consumo, aspecto fundamental en tiempos de crisis climática y escases de recursos. El objetivo de este trabajo es diagnosticar el uso y la eficiencia del recurso agua y energía eléctrica, elaborando una línea base y proponiendo acciones que permitan mejorar la eficiencia de sus procesos productivos. Para confiabilidad y comparación de este estudio, se decide usar la herramienta DMAIC de Six Sigma, la cual a través de su sistema estructurado permitió definir el problema, caracterizar el proceso y levantar datos de consumo, producción, flujos y características técnicas de equipos. Se determinaron indicadores de eficiencia, se identificaron pérdidas, oportunidades y causas, y en base a una priorización se propusieron acciones de mejora técnicas y administrativas. El estudio determinó que la fabricación de una tonelada de producto requiere en promedio 9,9 m³ de agua y 530,8 kWh de energía eléctrica. Como puntos críticos se identifican equipos con alta potencia eléctrica como motores y calefactores, sistemas de enfriamientos con baja eficiencia térmica, sistemas de vacío con descargas de agua no controladas y ausencia de sistemas de reutilización o reaprovechamiento de energía y agua. Además, se identifica que la baja productividad afecta directamente este indicador de eficiencia. Con estos resultados se proponen acciones técnicas y administrativas enmarcadas en un sistema de gestión que permita la mejora continua. Concluyendo, la fábrica tiene una baja eficiencia en el uso de energía eléctrica y agua por lo que tiene una gran oportunidad para mejorar su performance, contribuyendo así al desarrollo de la empresa y cuidado de los recursos naturales.

HIGHLIGHTS

ENERGÍA ELÉCTRICA Y AGUA EN FÁBRICA DE COMPUESTOS POLIMÉRICOS: DIAGNÓSTICO DE USO Y EFICIENCIA

Jorge Eduardo Espinosa Correa

- Se diagnostica el uso y eficiencia del agua y la energía eléctrica de fábrica de compuestos poliméricos.
- Se utiliza herramienta DMAIC de Six Sigma para el análisis de la problemática en esta fábrica.
- Se requiere de 530,8 kWh y 9,9 m³ para fabricar una tonelada de producto y la eficiencia del 2023 fue la más baja de los últimos 3 años.
- Disminuir el consumo de recursos y aumentar la productividad son los factores claves para mejorar la eficiencia.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	10
1.1.	OBJETIVOS	12
1.1.1	<i>Objetivo general</i>	12
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	13
2	BREVE DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA.....	13
3	METODOLOGÍA.....	17
4	RESULTADOS.....	20
4.1	DEFINIR.....	20
4.1.1	<i>Caso de estudio</i>	20
4.1.2	<i>Agua: Identificación de fuentes, circuitos y consumos</i>	22
4.1.3	<i>Energía eléctrica: Identificación de fuentes, circuitos y consumos</i>	28
4.2	MEDIR.....	34
4.2.1	<i>Datos del área operaciones</i>	34
4.2.2	<i>Datos del consumo de agua</i>	36
4.2.3	<i>Datos de consumo de energía eléctrica</i>	41
4.2.4	<i>Detección de fallas, pérdidas y oportunidades de mejora</i>	44
4.3	ANALIZAR.....	45
4.3.1	<i>Análisis uso de agua</i>	45
4.3.2	<i>Análisis uso de energía eléctrica</i>	49
4.4	MEJORAR.....	58
4.4.1	<i>Consumo de agua</i>	58
4.4.2	<i>Consumo de energía eléctrica</i>	63
4.4.3	<i>Propuesta de mejoras generales</i>	68
5	CONCLUSIONES.....	70
6	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	74
7	ANEXO: REPORTE DE PLAGIO	; ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: FUENTES DE AGUA Y SUS USOS EN LA FÁBRICA	22
TABLA 2: FUENTES DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y USO EN LA FÁBRICA	29
TABLA 3: DATOS DE PRODUCCIÓN	34
TABLA 4: DATOS ÁREA MANTENIMIENTO	35
TABLA 5: N° DE FALLAS VESAT POR LÍNEA DE PRODUCCIÓN.....	36
TABLA 6: CONSUMO AGUA MEDIDOR "PRINCIPAL" PERÍODO 2021-2023	36
TABLA 7: CONSUMOS DE AGUA POR MEDIDOR 2023	37
TABLA 8: CALCULO DE ESTIMACIÓN CONSUMO AGUA HUMANA	38
TABLA 9: CÁLCULO ESTIMACIÓN CONSUMO DE AGUA SISTEMA DE VACÍO	38
TABLA 10: CÁLCULO ESTIMACIÓN CONSUMO DE AGUA SISTEMA GALA.....	39
TABLA 11: DATOS TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	40
TABLA 12: CÁLCULO ESTIMACIÓN CAUDAL AGUA LAVADOR DE GASES.....	41
TABLA 13: MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA DISPONIBLES	41
TABLA 14: CONSUMOS ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIDOR "PRINCIPAL"	43
TABLA 15: CONSUMOS ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIDOR	43
TABLA 16: CONSUMOS ENERGÍA ELÉCTRICA POR LÍNEA DE PRODUCCIÓN 2023	44
TABLA 17: DETERMINACIÓN INDICADOR "INTENSIDAD USO DEL AGUA"	46
TABLA 18: DISTRIBUCIÓN GENERAL CONSUMOS DE AGUA MEDIDOR "PRINCIPAL"	47
TABLA 19: CONSUMO DE AGUA POR EQUIPO MEDIDOR "PRINCIPAL" 2023	47
TABLA 20: DISTRIBUCIÓN GENERAL CONSUMO ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIDOR "PRINCIPAL"	49
TABLA 21: DETERMINACIÓN INDICADOR USO INTENSIDAD ENERGÍA ELÉCTRICA PERÍODO 2021-2023.....	51
TABLA 22: DETERMINACIÓN INDICADOR USO INTENSIDAD ENERGÍA ELÉCTRICA POR LÍNEA DE PRODUCCIÓN 2023	52
TABLA 23: CUMPLIMIENTO INDICADORES DE MANTENIMIENTO 2023	53
TABLA 24: INCIDENCIAS Y HORAS DE SET UP	56
TABLA 25: RESUMEN PRINCIPALES CAUSAS INEFICIENCIA USO DE AGUA	59
TABLA 26: DETALLE COTIZACIÓN RECIRCULACIÓN AGUA SISTEMA VACÍO	61

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: PLANO Y UBICACIÓN FÁBRICA TOPCOLOR	20
FIGURA 2: IMAGEN REFERENCIAL EXTRUSORA	21
FIGURA 3: DIAGRAMA PROCESO PRODUCTIVO EXTRUSIÓN	22
FIGURA 4: CANOA DE ENFRIAMIENTO	24
FIGURA 5: IMAGEN REFERENCIAL TORRE DE ENFRIAMIENTO.....	25
FIGURA 6: IMAGEN REFERENCIAL FUNCIONAMIENTO BOMBA DE VACÍO	25
FIGURA 7: CIRCUITO GENERAL DE LA PLANTA, IDENTIFICACIÓN DE FUENTES Y USOS.	27
FIGURA 8: CIRCUITO GENERAL DE LA PLANTA, IDENTIFICACIÓN DE FUENTES Y USOS.	28
FIGURA 9: IMAGEN REFERENCIAL MOTOR DE EXTRUSORA.....	29
FIGURA 10: IMAGEN REFERENCIAL CALEFACTOR	30
FIGURA 11: IMAGEN REFERENCIAL MEZCLADOR O AGITADOR.....	30
FIGURA 12: IMAGEN REFERENCIAL DOSIFICADOR GRAVIMÉTRICO	31
FIGURA 13: FLUJO ENERGÍA ELÉCTRICA GENERAL	33
FIGURA 14: FLUJO ENERGÍA ELÉCTRICA CIRCUITO MEDIDOR "PRINCIPAL"	33
FIGURA 15: GRÁFICO INDICADOR USO INTENSIDAD DEL AGUA PERÍODO 2021-2023	46
FIGURA 16: GRÁFICO DISTRIBUCIÓN CONSUMO DE AGUA MEDIDOR "PRINCIPAL".....	47
FIGURA 17: GRÁFICO CONSUMOS DE AGUA MEDIDOR "PRINCIPAL" 2023	48
FIGURA 18: DIAGRAMA DE ISHIKAWA CONSUMO DE AGUA	49
FIGURA 19: GRÁFICO DISTRIBUCIÓN CONSUMOS ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIDOR "PRINCIPAL" 2023.....	50
FIGURA 20: GRÁFICO CONSUMOS ENERGÍA ELÉCTRICA POR LÍNEA DE PRODUCCIÓN 2023	50
FIGURA 21: GRÁFICO INDICADOR USO INTENSIDAD ENERGÍA ELÉCTRICA PERÍODO 2023.....	51
FIGURA 22: GRÁFICO INDICADOR USO INTENSIDAD ENERGÍA ELÉCTRICA POR LÍNEA DE PRODUCCIÓN 2023	52
FIGURA 23: GRÁFICO INCIDENCIAS POR FALLAS DE MANTENIMIENTO	54
FIGURA 24: GRÁFICO POR INCIDENCIAS DE CALIDAD.....	55
FIGURA 25: GRÁFICO POR INCIDENCIAS DE PROCESO	55
FIGURA 26: DIAGRAMA DE ISHIKAWA POR INEFICIENCIAS EN EL USO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	57
FIGURA 27: DIAGRAMA PROCESO DE PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA.....	58
FIGURA 28: IMAGEN REFERENCIAL SISTEMA EXTRACCIÓN DE VACÍO.....	61
FIGURA 29: SIMULACIÓN CAMBIO MOTOR SIEMENS	64
FIGURA 30: RESULTADOS SIMULACIÓN SISTEMA FOTOVOLTAICO ENEL	66
FIGURA 31: RESULTADOS SIMULACIÓN SISTEMA FOTOVOLTAICO MINISTERIO DE ENERGÍA.....	67
FIGURA 32: DIAGRAMA RESUMEN SISTEMA GESTIÓN DE ENERGÍA	67

1 INTRODUCCIÓN

Los polímeros son moléculas de gran peso molecular llamados monómeros, los cuales generan lazos entre sí a través del proceso de polimerización. Lo que hoy conocemos como plástico o resinas, básicamente corresponde a algún tipo de polímeros. Para la fabricación de estos productos se requiere el uso de agua y energía eléctrica, y este trabajo pretende ser una respuesta para mejorar el uso eficiente de estos recursos en una fábrica de compuestos poliméricos.

Historia y la industria del plástico

Las primeras investigaciones del plástico aparecen por el año 1830 cuando científicos comienzan a sintetizar materias primas que después serían aprovechadas para fabricar el plástico. Por el año 1907 el científico Dr. Leo Backeland introdujo los polímeros sintéticos y se descubren también algunos polímeros naturales fabricados a partir de la celulosa (Ocampo, 2015). Desde allí se crean los polímeros termoplásticos llamados polietileno (PP) y polipropileno (PE), luego el poliestireno (PS) y el poliestireno expandido (EPS). En adelante explota su uso creándose una amplia gama de productos para múltiples usos entregando soluciones al día a día de la humanidad. Sin embargo, no podemos desconocer el impacto ambiental de este material, desde la extracción de materias primas, hasta las externalidades negativas en sus procesos de transformación y manejo de sus usuarios. Uno de esos potenciales impactos ambientales son el consumo de agua y energía eléctrica, ejes centrales de este estudio.

La crisis del agua y la energía

De acuerdo a las Naciones Unidas (2022) en el mundo actualmente existen entre 2.000 y 3.000 millones de personas que sufren de escasez de agua para satisfacer necesidades básicas de supervivencia y se prevé que la población mundial urbana que actualmente sufre de escasez hídrica se duplique en los siguientes 25 años, pasando de los actuales 930 millones a 2.000 millones de personas. La creciente incidencia de sequías extremas y prolongadas también está estresando los ecosistemas, con consecuencias nefastas para las especies vegetales y animales. Respecto a la energía eléctrica, probablemente la escasez no es un factor considerablemente crítico debido a la variedad de fuentes energéticas existentes, sin

embargo, sí son factores de alto riesgo la problemática de regeneración (por ejemplo: combustibles fósiles y agua), el impacto ambiental y factores como la economía o conflictos bélicos que ponen en riesgo los suministros. Estos antecedentes confirman la importancia de trabajar en el cuidado de los recursos considerando la eficiencia como eje principal para disminuir los impactos.

La fábrica de estudio

La fábrica objeto de este estudio, mezcla polímeros plásticos con pigmentos y aditivos para obtener polímeros compuestos llamados masterbatch, los cuales son usados como materia prima en la industria del plástico para entregar color u otras propiedades especiales. TOPCOLOR es una compañía chilena ubicada en Santiago y que inició sus actividades en abril del año 1983, siendo pioneros y líderes del país en la fabricación de este producto. Con 40 años de experiencia, conjuga competencia, innovación y calidad, abasteciendo a las más diversas industrias de envases industriales, empaque de alimentos, farmacéutica, películas sopladas, láminas plásticas, entre otras. Actualmente, en términos de sustentabilidad y economía circular, TOPCOLOR está desarrollando la fabricación de resinas compostables que garantizan la biodegradación en 100 días, convirtiendo a TOPCOLOR en la primera empresa en Chile fabricando bio-resinas.

Del proceso productivo

Para el proceso de fabricación, la principal máquina utilizada es la extrusora. Este equipo es el encargado de transformar el plástico y fabricar objetos con formas, colores y otras características. Esta máquina utiliza procesos de acción a través del prensado, fusión, moldeado, presión y empuje de materiales hasta finalmente, en este caso, obtener un producto en formato pellet. La fabricación de estos productos requiere de otros equipos periféricos para completar el proceso: agitadores, mezcladores, enfriadores, peletizadores, entre otros.

Acerca del consumo de energía eléctrica y agua en esta fábrica

La energía eléctrica de este proceso productivo es consumida principalmente por motores de gran capacidad y sistemas de calefacción para el derretimiento del plástico. También se

utiliza energía eléctrica en los equipos periféricos y servicios como iluminación, servidores, entre otros. El agua es utilizada principalmente en procesos de enfriamiento y extracción de gases por sistemas de vacío. Otros servicios de la fábrica que consumen agua son los procesos de limpieza, higiene, comedor, entre otros.

La problemática en esta fábrica respecto al consumo de agua y energía eléctrica

La industria del plástico está en el ojo de la humanidad por ser considerada contaminante, ya sea por el origen de sus materias primas o por el mal uso de los humanos respecto a este material. Actualmente, esta fábrica no cuenta con un sistema de eficiencia en el uso de energía eléctrica y agua, entendiendo la eficiencia como un conjunto de acciones que permitan optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos finales obtenidos (Agencia de sostenibilidad energética, 2018). En esta fábrica no se controlan ni existen planes para reducir los consumos y ante esta ausencia se presume que el proceso puede ser más eficiente. Ante la nueva visión de la empresa, la cual pretende ser un protagonista en la transformación de la industria del plástico hacia la economía circular, es sumamente importante que se mantengan controlados y continuamente mejorando, los aspectos ambientales e impactos durante su proceso de fabricación.

Este estudio, haciendo uso de la herramienta DMAIC de la metodología Six Sigma, pretende ser una respuesta a la necesidad de esta fábrica de entender cómo abordar y enfrentar el uso y la eficiencia del agua y la energía eléctrica, siendo un aporte directo a la mejora en el camino de la sustentabilidad.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo general

- Diagnosticar el desempeño en el uso y consumo de energía eléctrica y agua en fábrica de compuestos poliméricos, identificar oportunidades y proponer acciones que mejoren la eficiencia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los consumos de energía eléctrica y agua, así como los procesos y equipos críticos de la fábrica.
- Usar DMAIC de Six Sigma como método estructurado para la búsqueda y análisis de desempeño, causas y mejoras para la eficiencia.
- Elaborar un plan que permita a esta fábrica de compuestos poliméricos mejorar la eficiencia en el uso de energía eléctrica y agua.

2 BREVE DISCUSIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA

Según Karki y Rao (2023) en Estados Unidos las industrias de la comida, el papel, del petróleo, las químicas y de metales, comprenden el 95% del retiro de agua para manufactura. Siendo los procesos de enfriamiento, condensación y generación de vapor aquellas que más contribuyen al consumo de agua, aproximadamente el 50%. El segundo proceso más importante en consumo de agua corresponde a la dilución, lavado, fabricación y transporte de productos, ocupando un 47%.

Como resultados previstos de procesos que implementen sistemas de eficiencia de agua, se calcula que el 94% de las industrias podrían reducir su huella hídrica total al abastecerse de empresas con estándares de eficiencia en el consumo de agua (Marston et al., 2018). Y, por el contrario, otro estudio señala que la reducción del agua no ha estado en el foco de las industrias ni de quienes hacen leyes (Rao, 2015).

En términos de consumo de energía, y a pesar de que en el año 2022 se ralentizó en un 50% el aumento del consumo eléctrico respecto a su año anterior (del 4,9 % en 2021 al 2,1 % en 2022) en cualquier caso este consumo fue mayor a la media mundial de 2010 a 2019 (1,4% por año) y de acuerdo a este mismo informe, la economía mundial retoma su tendencia de crecimiento (3,2%) lo que pronostica un aumento del consumo de energía eléctrica según Enerdata (2023).

Ante estos escenarios de crisis, resulta fundamental para la sostenibilidad del planeta cambiar nuestros hábitos de consumo hacia un estilo ecoeficiente como lo señala Dairy Australia (2004), es decir, mejorar la performance en términos productivos y de consumo: producir más usando menos. Así lo señala también Agencia de Sostenibilidad Energética (2018) señalando a la eficiencia como un conjunto de acciones que optimizan la relación entre energía consumida y productos obtenidos: hacer más con menos. Por su parte, la Guía Implementación de Sistemas de Gestión de la Energía basados en ISO 50.001 (2018) define a la eficiencia energética como la relación cuantitativa entre un resultado de bienes y una entrada de energía. Por último y en esta línea de conceptos de eficiencia, Naciones Unidas (2018) en su objetivo de desarrollo sostenible n° 12 llamado “Producción y consumos responsables”, establece que el consumo y la producción sostenible consiste en hacer más y mejor con menos.

Una de las herramientas que permite mejorar la eficiencia disminuyendo pérdidas es la metodología Six Sigma, creada originalmente por Motorola Inc. en los EE. UU. en el año 1985 cuando se enfrentaban a la amenaza de la competencia japonesa en la industria electrónica y necesitaban realizar mejoras drásticas en sus niveles de calidad (Harry y Schroeder, 2000). Six Sigma es un proceso de negocios que le permite a las empresas mejorar drásticamente sus ganancias, al diseñar y monitorear cada actividad de forma que minimicen el desperdicio y los recursos, mientras aumenta la satisfacción del cliente (Harry y Schroeder, 2000). Según los autores, es beneficioso implementar esta metodología ya que permite mejorar la calidad, aumentando la rentabilidad. Six sigma ha ganado amplia aceptación en la industria por los resultados demostrados por diferentes empresas a través de sus “buenas prácticas”, por ejemplo, en 1999 General Electric Company gastó 500 millones en iniciativas Six Sigma y recibió más de 2000 millones en beneficios para el año fiscal (Linderman et al., 2002).

Uno de los métodos de análisis usados en Six Sigma siguen el ciclo DMAIC (acrónimo de Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar). DMAIC proporciona un enfoque estructurado para las actividades de mejora y es un marco probado para obtener mejoras significativas en el rendimiento (Erdil et al., 2018). DMAIC se caracteriza por sus fortalezas en técnicas

estadísticas para la búsqueda de hechos y verificación en un proceso estructurado de resolución de problemas (De Mast & Lokkerbol, 2012).

Otra de las metodologías en enfoque de manufactura que ha generado mucho interés es Green Lean Six Sigma, la cual pretende ser una herramienta con enfoque ecológico para mitigar la huella de carbono y producir productos de altas especificaciones. Además, y siguiendo motivaciones como la mayor conciencia sobre la sostenibilidad y nuevas políticas gubernamentales, las industrias se han visto en obligación de cambiar sus dinámicas operacionales (Erdil et al., 2018b). La metodología combina la eliminación de residuos a través de DMAIC, se define la problemática, se mide el estado del sistema, se investigan las razones de residuos y emisiones asociadas usando herramientas como lluvia de ideas, Ishikawa, 5 porqué, ciclo de vida entre otros y finalmente se proponen posibles soluciones para la mejora en las diversas dimensiones de la sostenibilidad organizacional (Kaswan & Rathi, 2020). La literatura sugiere que el uso de Lean Six Sigma en la implementación de la sostenibilidad produce resultados positivos en el desempeño ambiental y económico (Antony et al., 2017).

De acuerdo al estudio de Calia et al. (2009), el cual evaluó y analizó más de 2000 proyectos para la prevención de la contaminación realizados entre 1995 y 2007 concluyó que el desempeño de dichos planes aumentó, en términos de número de proyectos completados y toneladas de contaminación evitadas, luego del uso de Six Sigma.

Para el caso de una empresa de la industria de manufactura 3D que aplicó el método DMAIC para mejorar la calidad y la sustentabilidad, el autor Delgadillo et al. (2022) desarrolla y explica como definieron indicadores claves y se escogieron los más relevantes respecto a desempeño, se analizaron sus causas y se diseñó un plan de mejora. Además del resultado práctico en la potencial mejora específica del estudio, el autor presenta el uso de DMAIC como un método útil para mejorar la calidad y la sostenibilidad.

En Srinivasan (2014) se presenta un caso de estudio de la eficiencia de un intercambiador de calor usando DMAIC, en la fase de definición se identifican parámetros críticos usando Pareto.

En la fase de medidas se determinó la efectividad del intercambio de calor. En el análisis se identificaron, a través de un diagrama de causa y efecto, las razones de la reducción en la efectividad resultando como principal causa la baja área de transferencia de calor. En la fase de mejora, usando sesiones de lluvias de idea, se propusieron modificaciones al diseño y mantenimiento, logrando aumentar la eficiencia en un 10%.

En Ranade (2021) para el estudio de un proceso de fundición en arena utilizando la metodología DMAIC, como primer paso se definió el planteamiento del problema respecto a reducir piezas defectuosas y se tomaron mediciones durante cuatro meses. Usando el enfoque estructurado de DMAIC se resuelve el problema con herramientas de calidad como histogramas, Pareto, gráficos de control y diagramas de causa y efecto. A partir del diagrama espina de pescado se obtienen conclusiones para seleccionar los tres parámetros más importantes en la preparación del molde para arena que luego son abordados por un plan de mejoras.

En Ángel (2013), se realiza un estudio para intentar mejorar la eficiencia del uso de agua desmineralizada en una caldera de vapor en un proceso de generación de energía eléctrica de ciclo combinado también se usó DMAIC. Luego de la aplicación del método el resultado arrojó la propuesta de un nuevo programa de mantenimiento y operación que redefine el trabajo de mantenimiento. La mejora de eficiencia y fiabilidad radica en la mejora en la disponibilidad de la central acompañada de una reducción de paradas y arranques forzosos por fallas, menos consumo de combustible y agua.

El estudio de Sakti et al. (2021) proporciona un marco DMAIC para evaluar el consumo de energía en una industria textil el año 2016. En su primera etapa define los procesos principales en el departamento de hilado y genera una medición recopilando datos históricos de la producción: tiempos de procesamiento, consumo de energía eléctrica y residuos generados. A partir de estos datos, se calculó el indicador de eficiencia de uso de energía eléctrica en cada área. Este indicador permitió comparar las diferentes áreas, priorizar en orden de magnitud y generar planes de mejora focalizados.

En Tian (2028) se tomó el análisis de falla realizado en una fábrica de ampollas la cual tenía una alta tasa de productos no conformes y al aplicar DMAIC y Pareto se identifica que la principal falla corresponde a la tapa trasera de la ampolla con una tasa de falla del 50%. Posteriormente se toman muestras de 100 lámparas aplicando un análisis FMEA para la detección de fallas. De acuerdo con este análisis se determinan 9 factores de influencia dividido en 3 etapas: entrada, proceso y salida. Factores causales como la variación humana, soldaduras deficientes y bobinado de hilos son atacados en un plan de mejora.

Del punto de vista industrial, en Karki & Rao (2023b), se señala que la medición de consumo, la aplicación de metodologías para determinar costos nivelados, auditorías hídricas y la búsqueda e implementación de buenas prácticas y tecnologías de eficiencia, son los caminos que pueden fortalecer a la industria contra los riesgos de disponibilidad de consumo existentes y futuros.

3 METODOLOGÍA

Para determinar si es posible que esta fábrica de compuestos poliméricos mejore su performance respecto al uso de la energía eléctrica y el agua, usaremos como herramienta la metodología DMAIC (Definir-Medir-Aplicar-Mejorar-Controlar) que es la hoja de ruta práctica de la metodología Six Sigma. Se trata de un método que permite obtener una mirada completa y profunda de algún proceso que se pretenda mejorar a través del análisis de datos cuantitativos y cualitativos. Estos análisis permiten tomar decisiones a través de la gestión de indicadores de un proceso con tal de mejorar el rendimiento. A continuación, se describe cada una de estas etapas:

- **Definir:** en esta etapa se deben identificar los problemas y defectos dentro de un proceso y a través de herramientas adecuadas que permitan visualizar datos. Siguiendo los pasos involucrados en esta fase, se pueden detectar problemas operacionales y oportunidades de mejora.
- **Medir:** En esta etapa se recopilan y analizan datos de los puntos principales del problema o foco de mejora. Es necesario que representen el escenario más realista procurando no perder información relevante. En esta etapa con el fin de aprovechar

la información recolectada, es recomendable definir, seleccionar y estructurar indicadores de desempeño. Estos indicadores permitirán realizar un análisis orientado a objetivos.

- **Analizar:** en la fase de análisis el objetivo es evaluar los resultados, hacer comparaciones, identificar desempeño, fortalezas y debilidades a través de las principales pérdidas. Con esta información y priorizando los hallazgos, a través de un método establecido identificar las causas raíz. Una herramienta usual para un análisis satisfactorio puede ser el método Ishikawa o espina de pescado.
- **Mejorar:** en esta etapa se define un plan de acción en base a la eliminación de las causas determinadas en la etapa anterior. Es crucial que se cumpla este enfoque para abordar la problemática enfocado en mejorar el rendimiento. Seleccionar indicadores puede llegar a ser clave para iniciar las acciones de mejora orientado al logro.
- **Controlar:** esta es la última etapa, se monitorean los indicadores definidos para asegurar que el rendimiento está mejorando y el proceso es estable. También se requiere en esta etapa una fidedigna recopilación de información y datos ya que los KPI son útiles para habilitar los procesos de monitoreo y mejora de la eficiencia.

A partir de lo anterior, se describen las acciones específicas para desarrollar cada etapa del método DMAIC aplicado a esta fábrica y el propósito de este estudio. Además, y considerando al alcance de este estudio, la etapa de control no será desarrollada.

Etapas 1: Definir

- **Establecer el marco del caso de estudio y la problemática:** Describir la lógica del marco propuesto considerando el proceso productivo, el objetivo del estudio y definiendo los indicadores relevantes para el análisis. Algunas variables podrían ser: consumo de agua y energía eléctrica, kilos fabricados, temperaturas, pérdidas, balances de masa y otros.
- **Levantamiento de proceso:** Entendimiento del proceso productivo. Recolección de información técnica mediante entrevistas, inspecciones y revisión de procedimientos, se obtendrá información técnica y detallada del proceso productivo, como se fabrica los productos, los principales equipos y etapas.

- **Identificación circuito de agua y energía eléctrica y fuentes de consumo:** en esta etapa se pretende levantar el flujo o circuito de estos recursos, desde donde ingresa, sus puntos de consumo y retorno. En ese camino, se identificarán los procesos que se llevan a cabo, que equipos y que áreas de la fábrica están involucrados. El resultado de esta primera etapa corresponde a un dibujo esquemático que permitirá identificar gráficamente el recorrido de la energía eléctrica y el agua incluyendo los equipos y áreas que lo consumen.
- **Identificación de pérdidas y fallas.** A través de inspecciones y entrevistas identificar pérdidas en los sistemas de consumo de agua y energía eléctrica como podrían ser: fugas de agua o fallas en tuberías o equipos, malas prácticas en el consumo de agua o energía eléctrica, consumos eléctricos sin razón aparente como pantallas, aire acondicionado, luminaria, etc.

Etapa 2: Medir

- **Recolección de datos y tabulación de datos.** Obtención de datos a partir de la revisión de boletas y facturas de energía eléctrica y agua, recolectar datos a través de medidores, obtener datos desde la plataforma de gestión de datos Wenu Work, realizar pruebas y mediciones manuales para estimar consumos de equipos que no cuenten con medidores, obtener datos de producción entendiendo variables de proceso y recolectar información desde el área de mantenimiento respecto a fallas que logran detener los procesos.
- **Definición de indicadores.** Con la información recolectada, definir indicadores que permitan analizar datos y desempeño orientado a objetivos.

Etapa 3: Análisis

- **Análisis de desempeño.** Tomando los datos recolectados, determinar el desempeño estableciendo una línea base y usando herramienta como Pareto u otras, intentar priorizar esfuerzos para mejorar el desempeño.
- **Identificación causa raíz:** Identificar, a través del método de Ishikawa, la causa raíz de las fallas y pérdidas que no permiten mejorar el desempeño o eficiencia.

Etapa 4: Mejorar

- **Investigación y determinación de mejoras al sistema.** Determinar cuáles podrían ser las opciones de mejoras y tecnologías disponibles para mejorar la eficiencia en el uso de agua y energía eléctrica.
- **Elaboración de la propuesta de plan para la eficiencia de agua y energía eléctrica.** Con la información y datos obtenidos y analizados, se proponen acciones que puedan mejorar la eficiencia, obtener potenciales ahorros de consumo, En medida de lo posible, realizar un análisis estimativo de capital de inversión y retorno.

4 RESULTADOS

Siguiendo estructuradamente la metodología DMAIC, esta sección se presenta con los siguientes apartados: DEFINIR, MEDIR, ANALIZAR y MEJORAR.

4.1 DEFINIR

4.1.1 Caso de estudio

La fábrica de estudio está ubicada en la ciudad de Santiago de Chile y cuenta con una superficie aproximada de 16.000 metros cuadrados (Figura n°1).

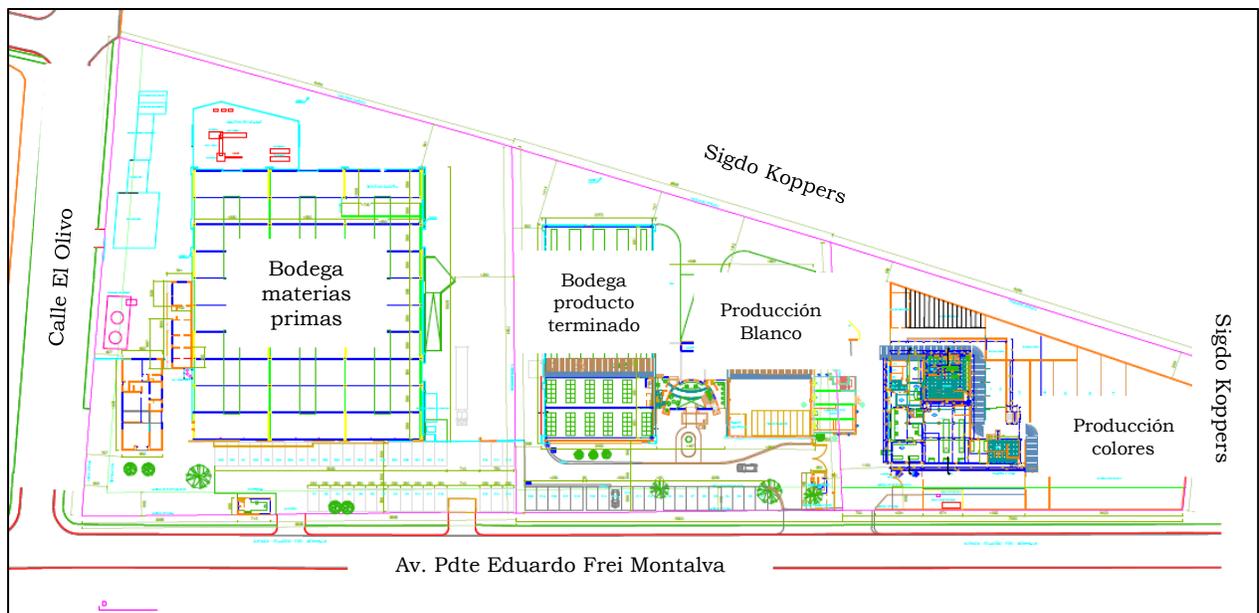


Figura 1: Plano y ubicación fábrica TOPCOLOR

Actualmente la fábrica no cuenta con un plan para mejorar la eficiencia del consumo de agua y energía eléctrica y a pesar de esto se identifican fortalezas e iniciativas en la línea de la eficiencia como el uso de llaves de agua de bajo consumo en baños, uso de luminaria LED y reemplazo de pasto natural por pasto sintético para evitar el riego. Se destaca también la gran variedad y cantidad de datos e indicadores que permiten generar una base para medir y analizar: horas de trabajo, kilos fabricados por la línea de producción, indicadores de fallas, tiempos de mantenimiento, consumos de agua y energía eléctrica, entre otros.

- **Proceso productivo**

El proceso productivo corresponde a la extrusión de plástico virgen con pigmentos y aditivos. Su principal equipo es la extrusora (Figura n°2), la cual requiere equipos complementarios como: dosificadores, enfriadores, secadores, peletizadores, entre otros. Las principales materias primas son resina plástica, pigmentos, y otros componentes químicos con propiedades aditivas como antifog, antiadherente, protección UV, entre otros. Las etapas del proceso productivo se grafican en la Figura n°3.

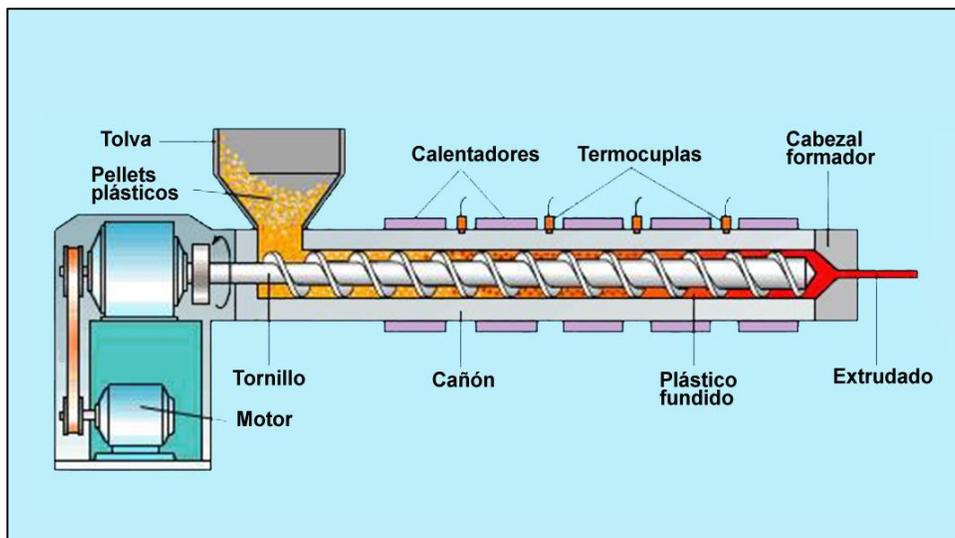


Figura 2: imagen referencial extrusora

Fuente: Tecnología de los Plásticos (tecnologiadelosplasticos.blogspot.com)

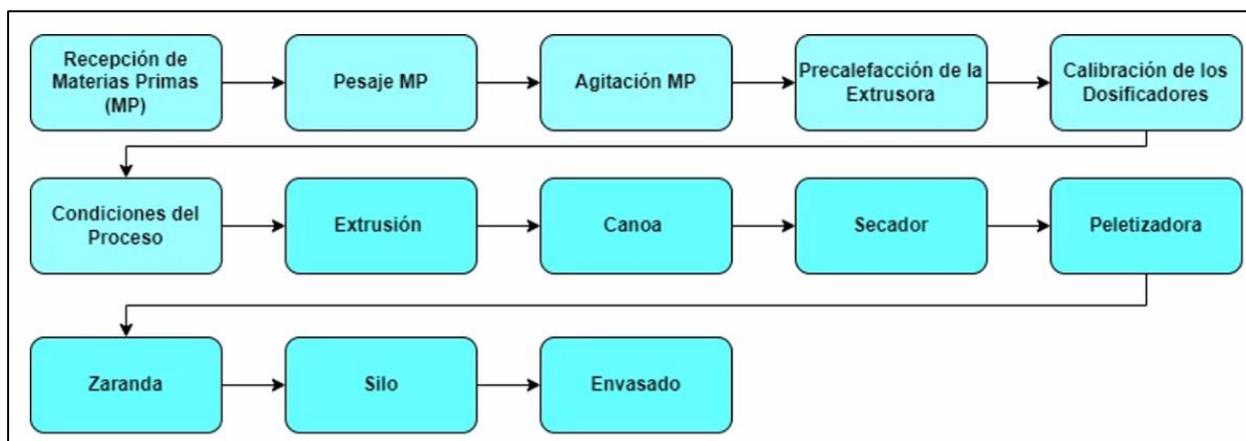


Figura 3: Diagrama proceso productivo extrusión
Fuente: TOPCOLOR S.A.

4.1.2 Agua: Identificación de fuentes, circuitos y consumos

La fábrica utiliza dos tipos de agua: agua de pozo subterráneo y agua potable desde el servicio sanitario local. El detalle se muestra en la Tabla n°1.

Tabla 1: Fuentes de agua y sus usos en la fábrica

Nº	Tipo de agua	Nombre o denominación	Uso del agua
1	Agua de pozo	Pozo	Proceso productivo líneas Blanco y Aditivo / Sistema de combate de incendio
2	Agua potable desde servicio sanitario local	Principal	Proceso de fabricación Líneas de Colores / Laboratorio control de calidad / Edificio Administrativo / Comedor / Servicios sanitarios / Vestidor
3	Agua potable desde servicio sanitario local	Portería	Edificio Gerencia / Respaldo de agua para proceso productivo líneas Blanco y Aditivo / Sistema de combate de incendio
4	Agua potable	El Olivo	Servicios sanitarios / Vestidor 2

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen los principales equipos con consumo de agua en el proceso productivo.

- **Sistema peletizador corte bajo agua “GALA”**

Este sistema es utilizado para el corte de pellet utilizando un cuchillo giratorio en un sistema cerrado y completamente inundado de agua. Cuenta con una batea acumuladora de agua, un

equipo centrífugo para secar y extraer los pellets desde el circuito de agua y una bomba que impulsa y recircula el fluido desde la batea hacia un sistema de enfriamiento y el peletizador. Las líneas n°7, 8, 9 y 10 cuentan con este sistema.

- **Sistema intercambiador de calor batea GALA**

En los sistemas de corte GALA se requiere la recirculación de agua entre el peletizador, el equipo centrífugo y la batea, esta agua se calienta producto del contacto con el plástico caliente por lo que requiere de un sistema de enfriamiento que permita mantener la temperatura óptima para el enfriamiento del pellet. Al igual que otros intercambiadores de calor, cuenta con un circuito interno de recirculación para el agua en contacto con el plástico y un sistema externo para el enfriamiento de esta agua recirculando entre el intercambiador y la torre de enfriamiento.

- **Sistema intercambiador de calor extrusora**

Las extrusoras cuenta con un sistema de calefacción que calienta a través de resistencias eléctricas y enfría usando agua con dos circuitos cerrados. El primero funciona con agua desmineralizada con flujo entre el intercambiador y la extrusora por lo que la función de esta agua es enfriar los calefactores. El segundo corresponde a un circuito exterior al intercambiador de la extrusora y cuya finalidad es enfriar el agua del circuito mencionado anteriormente, es un flujo entre la torre de enfriamiento y el intercambiador. Todas las extrusoras de la fábrica cuentan con este sistema.

- **Sistema intercambiador de calor aceite hidráulico del motor de la extrusora**

Todas las extrusoras cuentan con un motor cuya función es hacer girar el eje. El aceite lubricante de estos motores requiere enfriamiento por tanto se utiliza un sistema de intercambiador de calor cerrado. Al igual que el intercambiador de calor de las extrusoras, este sistema tiene dos circuitos: uno interno que recircula entre la caja hidráulica y el intercambiador y otro externo entre el intercambiador y la torre de enfriamiento. El agua del sistema externo retorna hacia la torre.

- **Canoa enfriamiento de tallarines**

La canoa de enfriamiento es un recipiente abierto en su parte posterior (Figura n°4), de aproximadamente 3 metros de largo, contiene agua fría provenientes de las torres de enfriamiento y cuya función es enfriar por contacto los tallarines plásticos salientes de la extrusora. Luego del enfriamiento los tallarines pasan por un secador y peletizadora. El agua de estas canoas retorna hacia las torres de enfriamiento.

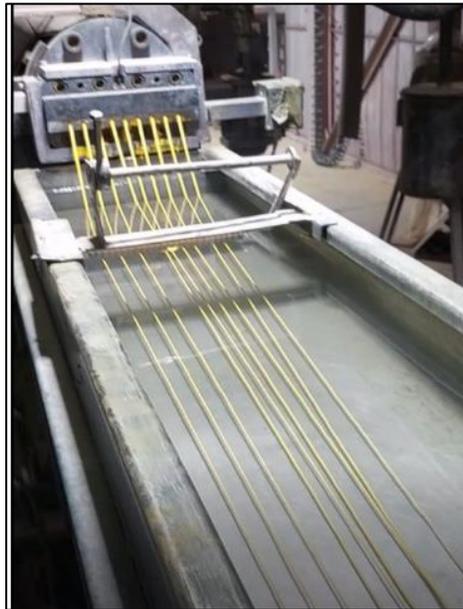


Figura 4: canoa de enfriamiento
Fuente: TOPCOLOR S.A.

- **Torre de enfriamiento**

Este equipo, a través del principio de enfriamiento evaporativo, es responsable de enfriar el agua proveniente de los diferentes procesos térmicos de la fábrica y transmite a la atmósfera el calor excedente (Caloryfrio, 2018b), una imagen referencial se presenta en la Figura n°5. Los equipos se alimentan exclusivamente de agua blanda y, como función adicional, abastece de agua blanda a los sistemas de vacío.

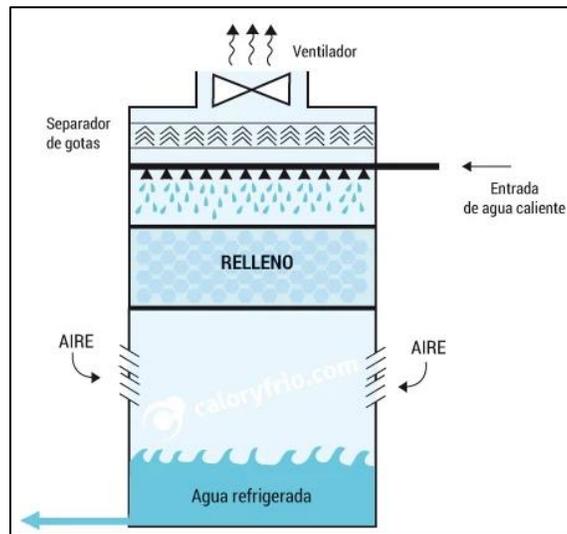


Figura 5: Imagen referencial torre de enfriamiento
Fuente: caloryfrio.com

- **Sistema extracción de gases por vacío**

A través del uso de una bomba hidráulica y un anillo de agua (Figura n°6), este sistema realiza vacío desde las recámaras de la extrusora con el objetivo de extraer gases que afectan la calidad del producto. A través del movimiento del rodete interior de la bomba se extrae y comprime el gas (Equirepsa, 2024), luego lo expulsa por la salida del sistema hacia un equipo desgasificador. Después, esta agua se desecha.

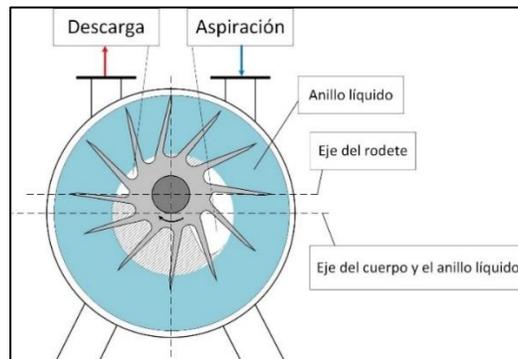


Figura 6: imagen referencial funcionamiento bomba de vacío
Fuente: Bombas de vacío – Equirepsa

A partir de la información recolectada se desarrollaron diagramas de flujo del agua que identifican las fuentes y el circuito del agua hacia los principales equipos. Las flechas negras son usos de agua, los rojos desecho y los verdes retornos. Esta forma gráfica de observar el

recorrido facilita la identificación de equipos, consumos, pérdidas y oportunidades de mejora. En las Figura n°7 se presenta el diagrama general del flujo de agua considerando las 4 fuentes de agua y en la Figura n°8 se presenta el detalle de la fuente llamada “Principal” que abastece a una de las zonas productivas de esta fábrica. No se presentan diagramas o mapas de agua en detalle para las fuentes 1, 3 y 4 ya que no han sido consideradas en el alcance de este estudio.

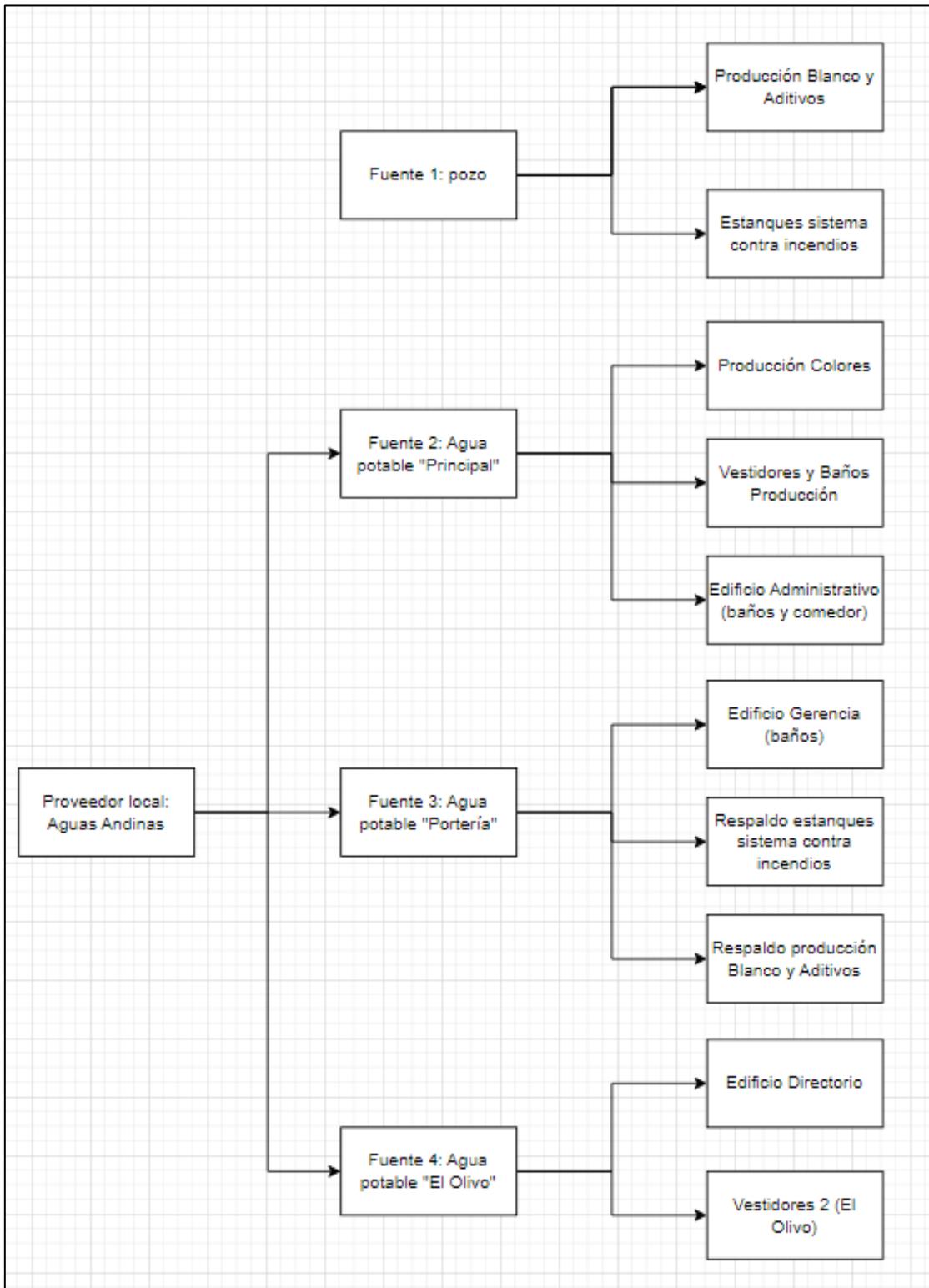


Figura 7: Circuito general de la planta, identificación de fuentes y usos.
Fuente: Elaboración propia

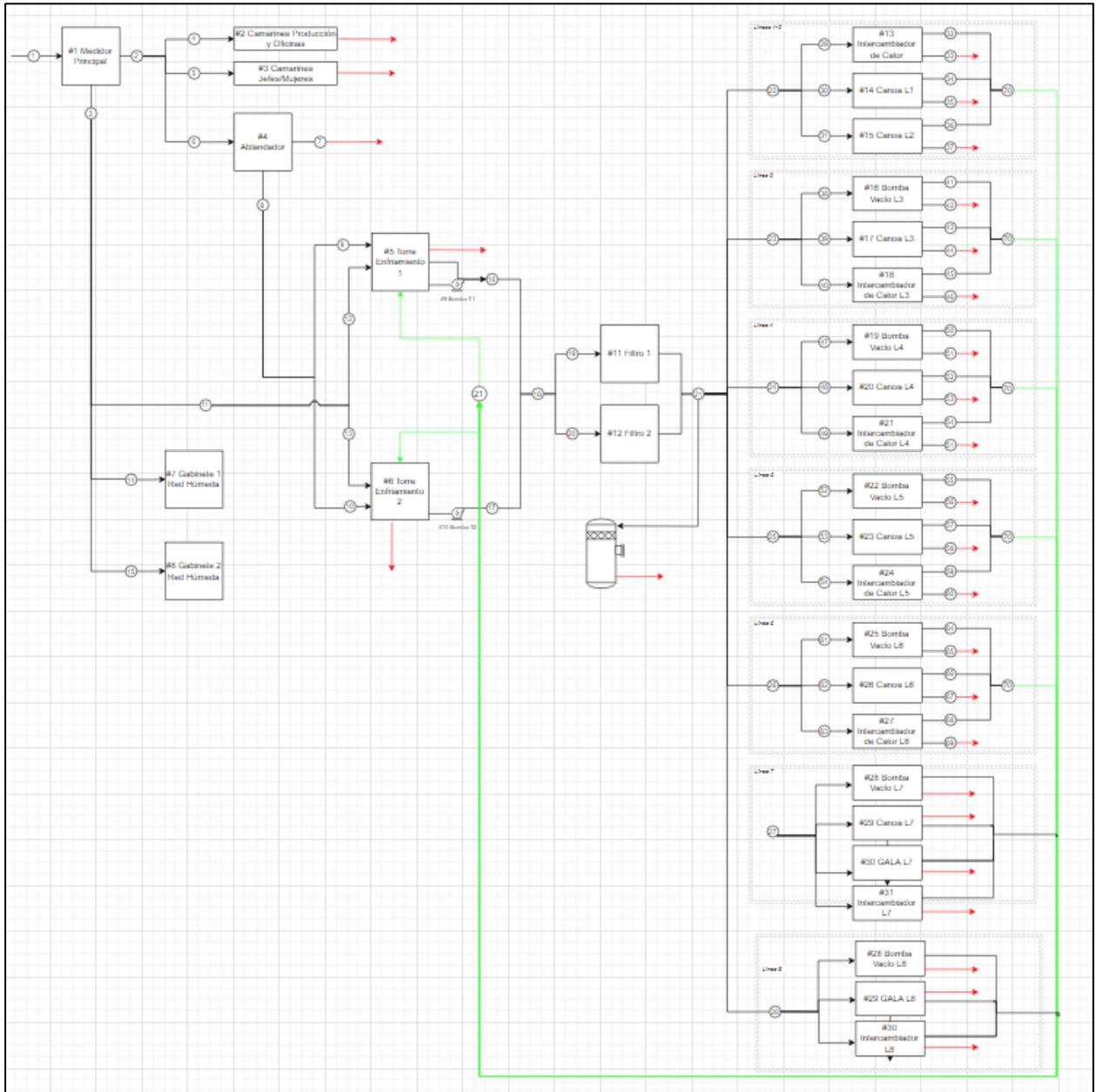


Figura 8: Circuito fuente “Principal”, identificación de fuentes y usos.
Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Energía eléctrica: Identificación de fuentes, circuitos y consumos

La fábrica cuenta con dos fuentes de energía eléctrica, ambas provenientes del proveedor local “Enel” y según detalla la Tabla n°2.

Tabla 2: Fuentes de energía eléctrica y uso en la fábrica

Nº de fuente	Nombre o denominación	Uso de la energía eléctrica
1	Principal	Edificio Gerencia Edificio Administrativo Servicios higiénicos y vestidores Laboratorios Líneas de producción
2	Bodegas	Bodega de materias primas Planta de reciclaje

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen los principales equipos con consumo de energía eléctrica en el proceso productivo:

- **Motor de extrusora**

La extrusora requiere que su tornillo gire con fuerza para mezclar los ingredientes (resina, pigmentos, aditivos y otros). Este tornillo se gira por un eje conectado a un motorreductor y luego a un motor eléctrico (Figura nº9). Dependiendo del tamaño y capacidad de la extrusora corresponderá al tamaño del motor. La necesidad de fuerza requerida al motor está directamente relacionado al consumo de energía eléctrica.



Figura 9: Imagen referencial motor de extrusora

Fuente: SIEMENS

- **Calefacción para derretimiento de resina**

Para derretir el plástico se utilizan calefactores eléctricos con bobina de resistencia (Figura nº10). Estos calefactores son puestos en serie y alrededor de la cámara de extrusión lo que,

de acuerdo al tipo de producto, permite adecuar las temperaturas de forma independiente uno de otro. En esta fábrica hay extrusoras que usan desde 7 a 11 zonas de calefacción, cada calefactor tiene potencias que van desde los 1.500 a 3.000 kW y las temperaturas de seteo varían entre los 150 y 270 °C.



Figura 10: Imagen referencial calefactor
Fuente: COMIND

- **Mezcladores o agitadores**

Es un equipo compuesto por un recipiente metálico (Figura n°11) donde se adicionan ingredientes en polvo y a través de aspas y movimientos del recipiente se mezcla el producto que posteriormente se adicionará a la extrusora.



Figura 11: Imagen referencial mezclador o agitador
Fuente: Plasmec

- **Dosificador volumétrico**

Equipo responsable de alimentar la extrusora con las materias primas a través de principios gravimétricos o pérdida de peso, una imagen referencial se presenta en la Figura n°12. Trabajan en coordinación con el movimiento de los tornillos aumentando o disminuyendo la dosificación de acuerdo con el nivel de alimentación deseado. Su funcionamiento depende de celdas de carga, sensores de velocidad, motores y sellos. Todo sincronizado a través de sistemas tipo PLC.



Figura 12: imagen referencial dosificador gravimétrico
Fuente: Coperion

- **Secadora**

Equipo que arroja aire y cuya función es quitar humedad del tallarín plástico saliente del proceso de enfriamiento en canoas.

- **Peletizadora**

Equipo que usando cuchillos giratorios corta el tallarín plástico obteniendo su forma final de pellet. Hay peletizadoras en seco y con corte bajo agua.

- **Sopladores**

Equipo que a través de un motor genera viento y empuja los pellets hacia su almacenamiento en silos previo a su proceso de envasado.

- **Bombas de vacío**

Bombas tipo centrífugas que ayudan a realizar el proceso de vacío para la extracción de gases y vapores no deseados desde la extrusora.

- **Invasadoras semiautomáticas**

Equipos que a través de sistemas de apertura y cierre de válvulas dejan caer por gravedad los pellets para permitir su envasado en bolsas.

- **Torres de enfriamiento**

Equipo para el enfriamiento de agua a través del principio de enfriamiento evaporativo y que utiliza bombas centrífugas para la impulsión de agua y aspas en la parte posterior de la torre para extraer el vapor.

- **Apiladores eléctricos**

Equipos tipo montacargas que permiten el movimiento de carga al interior de las bodegas y usan baterías eléctricas.

- **Otros servicios como iluminación, computadores, servidores, climatización, entre otros.**

A partir de la información recolectada con entrevistas y visitas en terreno se desarrollaron mapas de flujo de la energía eléctrica que identifican las fuentes y el circuito de la energía hacia los principales procesos y equipos, facilitando la identificación de consumos, pérdidas y mejoras. En la Figura n°13 se presenta el flujo general de la planta con sus dos fuentes provenientes del proveedor local ENEL. En la Figura n°14 se presenta el flujo de la energía desde el medidor llamado “Principal”.

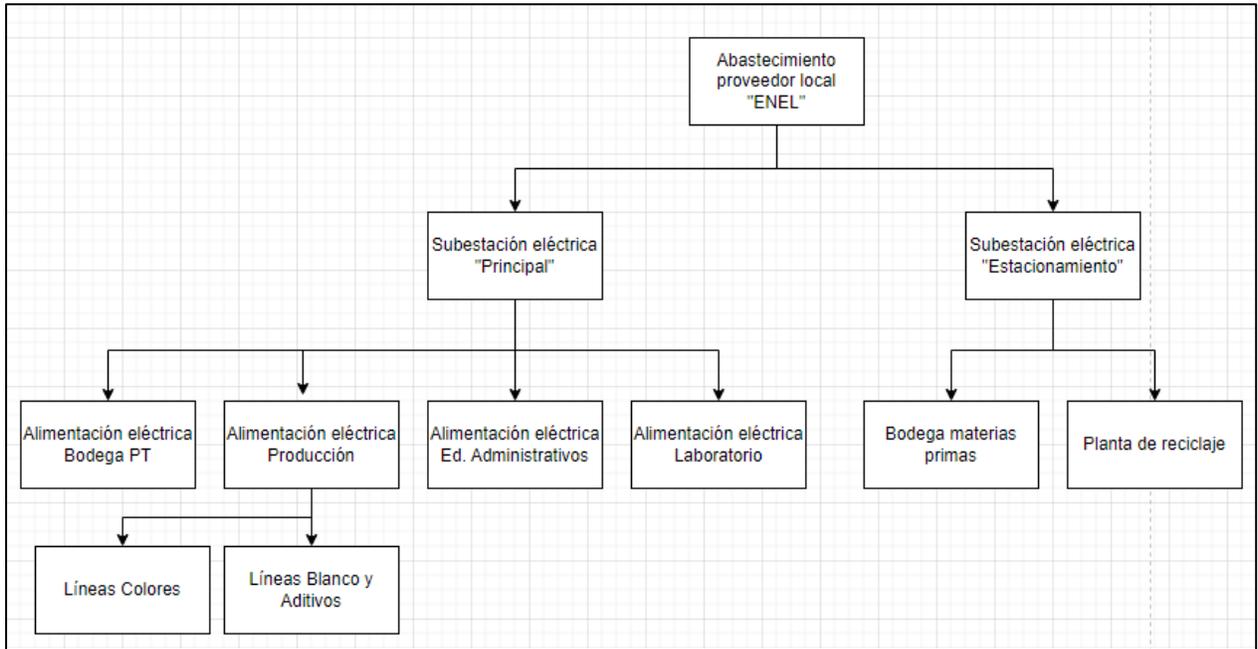


Figura 13: Flujo energía eléctrica general
Fuente: Elaboración propia

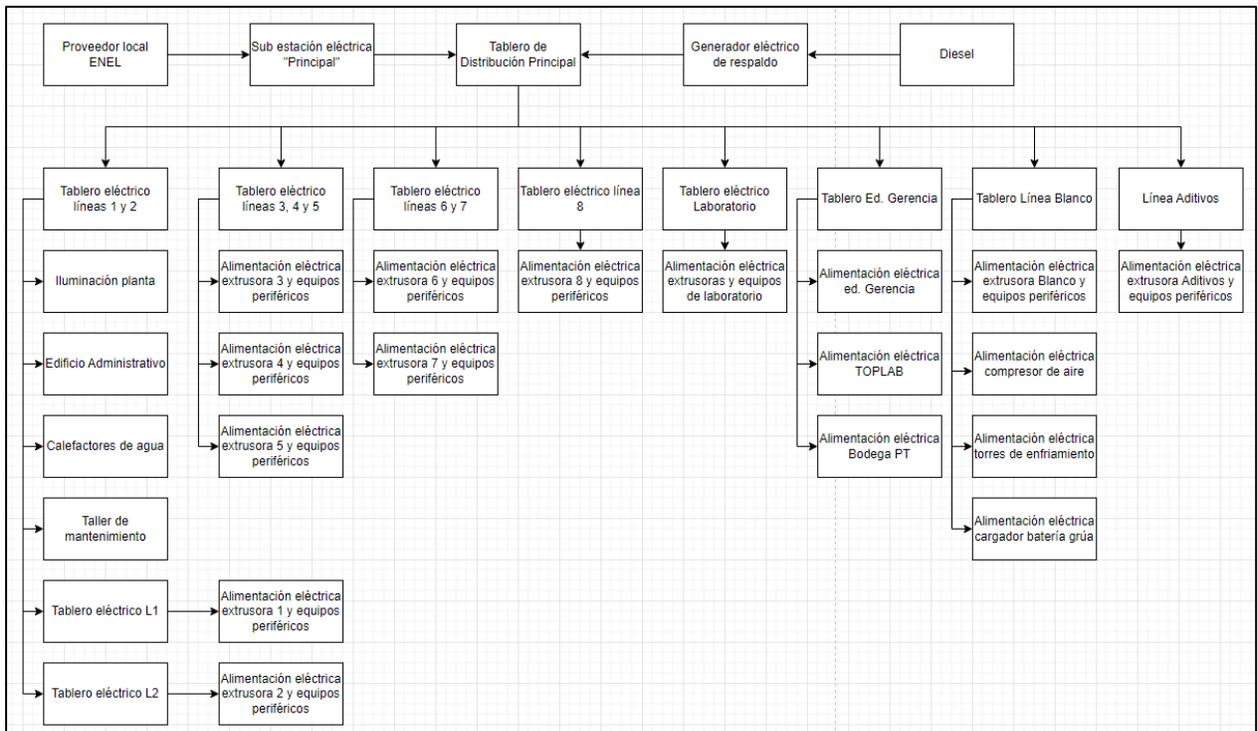


Figura 14: Flujo energía eléctrica circuito medidor "Principal"
Fuente: Elaboración propia

4.2 MEDIR

4.2.1 Datos del área operaciones

La primera fuente de datos identificada en este estudio proviene de los procesos operacionales de la fábrica: principalmente kilos fabricados, horas de extrusión, entre otros. Los datos productivos se obtienen de un software diseñado especialmente para esta fábrica llamado VESAT, que centraliza todos los datos relacionados con variables del proceso obtenidos automáticamente o manualmente. Además, se cuenta con un ERP de gestión llamado Microsoft AX, desde allí se administran ordenes de proceso, stocks y costos.

Los principales datos de producción para el período 2021-2023 se muestran en la Tabla n°3.

Tabla 3: Datos de producción

	2021	2022	2023
Dotación promedio trabajadores	115	125	130
Producción total (ton)	7.273	6.261	5.592
Producción líneas color (ton)	2.319	2.029	1.862
Producto terminado en proceso (ton)	Sin datos	62	138
Rendimiento planta (kg/h)	336	255	266

Fuente: Elaboración propia

La segunda fuente de datos proviene del área de Mantenimiento. La fábrica cuenta con un equipo de mantenimiento interno compuesto por personal técnico mecánico, eléctrico e instrumentistas, también un planificador. Ellos son los responsables de llevar el programa de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos. Actualmente, la fábrica trabaja con un software llamado GLPI para la gestión de ordenes de trabajo, sin embargo, no todas las fallas u ordenes de trabajo están contenidas allí, por eso se presentarán datos solo de la fuente VESAT.

VESAT, al ser un software de control de procesos, registra manual y automáticamente detenciones forzadas de la extrusora por lo que se asume que es una falla la que genera la detención, sin embargo, y luego de que el técnico repone la falla en modo urgencia, no siempre ingresan esta información a la plataforma GLPI, allí donde se puede generar

diferencia de datos. Por otra parte, en GLPI se gestionan las ordenes de trabajo más formales, pudiendo acceder a información específica de la falla como la fecha, la duración, el detalle de la reparación, el equipo en cuestión, etc.

El área de mantenimiento maneja otros indicadores como el TMEF (Tiempo medio entre fallas) y el TMPR (Tiempo medio para reparación), los cuales definen la disponibilidad de producción de los equipos en función de la confiabilidad y el mantenimiento.

La detención forzosa de un equipo presume un derroche energético debido al gran requerimiento de los equipos para alcanzar, nuevamente, el set up de operación. Los datos recopilados desde mantenimiento se presentan en la Tabla n° 4 y consideran principalmente datos de fallas que detuvieron la línea de producción.

Tabla 4: Datos área mantenimiento ene-dic 2023

MES	N° de fallas VESAT	TMEF	TMPR
ene-23	38	39	3,1
feb-23	51	54	2,9
mar-23	63	47	2,6
abr-23	60	48	2,7
may-23	64	52	3,2
jun-23	77	36	2,1
jul-23	63	47	2,8
ago-23	71	45	2,6
sep-23	78	33	3,9
oct-23	83	39	2,9
nov-23	78	44	3,0

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla n°5 se presenta el número de otras incidencias que detuvieron la producción: calidad, proceso y set up.

Tabla 5: N° de fallas VESAT por línea de producción

Línea	N° de fallas Calidad	N° de fallas por Proceso	N° de set up
1	47	5	16
2	256	4	4
3	354	261	204
4	18	182	213
5	265	201	228
6	266	138	273
7	69	170	189
8	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Blanco	19	216	179
Aditivos	3	164	93
TOTAL	1.288	1.341	1.400

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Datos del consumo de agua

Para el proceso de medición de consumos de agua se utilizaron facturas del proveedor y mediciones manuales. El agua proveniente de pozo no cuenta con medidor de agua por lo que no es posible medir ni analizar. Es por este motivo que para efectos de este trabajo los datos de medición y análisis se enfocará solo en las líneas de color, las cuales utilizan el agua proveniente de la fuente o medidor "Principal" como se señala en la Tabla n°6. En adicional se presentan los datos de consumo por medidor en la Tabla n°7.

Tabla 6: Consumo agua medidor "Principal" período 2021-2023

2021	2022	2023
20.520 m3	21.000 m3	19.655 m3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Consumos de agua por medidor 2023

Mes	Consumo medidor principal (m3)	Consumo medidor portería (m3)	Consumo medidor El Olivo (m3)	Consumo total planta (m3)
ene-23	651	586	67	1.304
feb-23	1.666	1.364	65	3.095
mar-23	2.111	1.081	68	3.260
abr-23	1.450	1.104	95	2.649
may-23	1.823	743	68	2.634
jun-23	1.767	801	99	2.667
jul-23	2.177	1.228	222	3.627
ago-23	2.047	902	55	3.004
sep-23	1.429	920	74	2.423
oct-23	1.371	292	40	1.703
nov-23	1.582	671	52	2.305
dic-23	1.581	619	44	2.244
TOTAL	19.655	10.311	949	30.915

Fuente: Elaboración propia

Debido a la ausencia de medidores de agua en diferentes equipos o procesos, se deben asumir ciertas afirmaciones para estimar consumos específicos dentro de la fábrica.

- **Agua de consumo humano**

Se toma como referencia los datos entregados por el Gobierno de Chile el cual señala que el consumo promedio de agua de un chileno varía entre los 125 y los 200 litros de agua (Gobierno de Chile, 2015) incluyendo labores domésticas de higiene, preparación de alimentos, riego, entre otros. Considerando que en esta fábrica los consumos de agua personal son principalmente para la higiene de baños y duchas, no hay riego ni preparación de alimentos, definiremos el consumo promedio por persona en 125 litros, el más bajo de acuerdo a la fuente recientemente citada. En esta fábrica conviven diariamente, en promedio, 120 personas, de las cuales 102 trabajan con turno de lunes a viernes y 18 de lunes a sábado. En la Tabla n°8 se presenta el cálculo estimado de agua para consumo humano en esta fábrica.

Tabla 8: Calculo de estimación consumo agua humana

Turno	N° trabajadores	Consumo de agua diario promedio (litros)	Días de trabajo mensual promedio	Consumo estimado de agua mensual (m3)	Consumo total estimado de agua mensual (m3)	Consumo estimado 12 meses (m3)
Lunes a viernes	102	125	22	280,5	339	4.068
Lunes a sábado	18	125	26	58,5		

Fuente: Elaboración propia

- **Sistemas de vacío**

Considerando que no existen medidores de agua para los sistemas de vacío, a través de mediciones manuales se determinó el caudal promedio de consumo agua y la cual requiere asumir ciertas condiciones: 1) todos los sistemas de vacío de la planta son similares en sus características técnicas y tamaño; 2) la condición habitual de caudal de agua corresponde a la válvula abierta 100%. Considerando que el caudal se calcula mediante la formula $Q=V/t$, donde Q (caudal), V (volumen) y t (tiempo), en la Tabla n°9 se presentan los resultados.

Tabla 9: Cálculo estimación consumo de agua sistema de vacío

Línea	Volumen recolectado (litros)	Tiempo de llenado (segundos)	Caudal (Q) =V/T (l/s)	Caudal (l/min)	Caudal (l/hr)
1	20	120	0,16	10,00	600
3	20	197	0,10	6,09	365
4	20	125	0,16	9,60	576
5	20	155	0,12	7,74	465
7	20	145	0,13	8,27	497

Fuente: Elaboración propia

El promedio de consumo de agua por hora de los sistemas de vacío de las líneas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 es: **501 litros por hora.**

La estimación de consumo total de agua de los sistemas de vacío en las líneas de color estará dada por el producto de las horas de trabajo de las extrusoras y el caudal de consumo de agua promedio obtenido anteriormente, por lo tanto, la estimación de consumo total de agua de los sistemas de vacío en el año 2023 es de: **5.927 m3.**

- **Sistemas de corte GALA**

Los sistemas de corte GALA cuentan con una batea que acumula agua para recircular entre el peletizador y el centrífugo. Esta agua se calienta producto del contacto con el plástico por lo que debe pasar por un sistema de enfriamiento. El agua de la batea es renovada cada una semana aproximadamente. Este sistema GALA no es completamente cerrado ya que para mejorar el enfriamiento se le inyecta un pequeño caudal de agua que al rebalsar la batea genera una descarga. Esta descarga fue medida a través de medición manual y estimando su consumo bajo las siguientes condiciones: los sistemas corte GALA son iguales para la línea 7 y 8 y la apertura de la válvula de alimentación se mantiene abierta a $\frac{1}{4}$. En la Tabla n°10 se presentan los datos de cálculo.

Tabla 10: Cálculo estimación consumo de agua sistema GALA

Línea	Volumen batea (m3)	Volumen recolectado (litros)	Tiempo de llenado (segundos)	Caudal (Q) =V/T (l/s)	Caudal (l/hr)
7 y 8	0,35	20	480	0,04	150

Fuente: Elaboración propia

La línea 8 trabaja 100% de sus horas de extrusión con corte Gala, no así la línea 7, la cual alterna el uso de GALA y batea de enfriamiento de acuerdo con el tipo de producto a fabricar. De acuerdo con datos de producción, las horas de trabajo en L7 con sistema GALA y L8 en el año 2023 corresponden a 3.000 y 103 respectivamente. Con ese dato más una definición de 50 recambios de agua en el año. Se estima que el agua consumida por estos equipos es de **465 m3**.

- **Rechazo por generación de agua blanda**

De acuerdo con la información técnica entregada por el proveedor de los sistemas de ablandamiento de agua COTACO, el rechazo de agua por regeneración corresponde a 75 litros cada 1.000 litros de agua blanda generada, es decir, el 7% del agua consumida es rechazada. Considerando que el consumo de agua en Producción en el año 2023 fue de 16.401 m3 aproximadamente, y asumiendo que actualmente toda el agua utilizada en la planta es del tipo blanda, se calcula que el agua de rechazo de los sistemas ablandadores en el año 2023 fue de **1.148 m3**.

- **Perdidas por evaporización en torre de enfriamiento**

Los sistemas de torres de enfriamiento basan su diseño en el principio de enfriamiento por evaporización, por lo tanto, hay una parte del agua que se evapora por tanto se pierde. En la Tabla n°11 se presentan los datos de operación de las torres y la tasa de evaporación estará dada por la siguiente fórmula:

Tasa consumo de agua por evaporación (m³/día): $gpm \times \text{dif. de } t^{\circ} \text{ en el agua} \times \text{horas de funcionamiento} \times 0,00023$

Tabla 11: Datos torre de enfriamiento

Caudal (galones por minuto)	38
Diferencia de temperatura (°C)	5
Horas de funcionamiento semanal	136

Fuente: Elaboración propia

Tasa consumo de agua por evaporación = $38 \times 5 \times 136 \times 0,00023$

Tasa consumo de agua por evaporación = 5,94 m³

Como este sistema cuenta con dos torres de enfriamiento, se estima que la pérdida diaria por evaporación es de 11,88 m³. Considerando que la planta opera 48 semanas al año, la pérdida estimada de agua por evaporación en un año es de **570,54 m³**.

- **Agua para equipo lavador de gases líneas de Color**

La planta cuenta con un equipo destinado para la extracción de gases vapores y polvo que funciona con sistemas de eyección y lavado con agua por aspersores generando altos niveles de presión para producir aire limpio. Este equipo cuenta en su interior con un flujo continuo de agua a través de aspersores para facilitar la precipitación de partículas de polvo. Esta adición de agua al equipo requiere, por tanto, un flujo continuo de descarga por rebalse. De forma manual se midió el caudal de descarga y se estimó el consumo anual considerando el tiempo de operación del equipo, el cálculo se presenta en la Tabla n°12.

Tabla 12: Cálculo estimación caudal agua lavador de gases

Volumen recolectado (litros)	Tiempo de llenado (segundos)	Caudal (l/h)
1,2	60	72

Fuente: Elaboración propia

Este equipo tiene operación continua durante el funcionamiento de las líneas de producción Color, el cual se calcula en aproximadamente en 120 horas semanales con 48 semanas de funcionamiento por año. El consumo de agua total de este equipo para el año 2023 se estima en **414,72 m3**.

4.2.3 Datos de consumo de energía eléctrica

Actualmente la fábrica cuenta con 2 medidores de energía eléctrica pertenecientes al proveedor local. Además, se cuenta con medidores en circuitos específicos. Estos medidores están conectados a un software que permite observar los consumos en tiempo real, datos históricos y estadísticas. El proveedor que facilita este servicio se llama Wenu Work.

Los circuitos que cuentan con medidor y el detalle de los equipos o sistemas que alimentan se detallan en la Tabla n°13.

Tabla 13: Medidores de energía eléctrica

Medidor	Equipos o sistemas que son parte de ese circuito de medición
Principal	<ul style="list-style-type: none"> • Edificio Gerencia • Edificio Administrativo • Servicios higiénicos y vestidores • Laboratorios • Líneas de producción y equipos auxiliares
Tablero distribución	<ul style="list-style-type: none"> • Línea 1 • Línea 2 • Vestidor 1 / Termos agua caliente • Edificio Administración (computadores, aires acondicionados, iluminación, otros) • Talleres: mecánico, eléctrico y SSGG • Pañol • Comedor • Montacargas

Línea de producción color 3	<ul style="list-style-type: none"> Extrusora línea 3 y equipos periféricos: Motor, calefactores, dosificadores, agitador, secador, peletizador, zaranda, soplador y picadora
Línea de producción color 4	<ul style="list-style-type: none"> Extrusora línea 4 y equipos periféricos: Motor, calefactores, dosificadores, agitador, secador, peletizador, zaranda, soplador y picadora
Línea de producción color 5	<ul style="list-style-type: none"> Extrusora línea 5 y equipos periféricos: Motor, calefactores, dosificadores, agitador, secador, peletizador, zaranda, soplador y picadora
Línea de producción color 6	<ul style="list-style-type: none"> Extrusora línea 6 y equipos periféricos: Motor, calefactores, dosificadores, agitador, secador, peletizador, zaranda, soplador y picadora
Línea de producción color 7	<ul style="list-style-type: none"> Extrusora línea 7 y equipos periféricos: Motor, calefactores, dosificadores, agitador, secador, peletizador, zaranda, soplador y picadora
Línea de producción Aditivo	<ul style="list-style-type: none"> Extrusora línea Blanco y equipos periféricos: motor, calefactores, dosificadores, agitador, secador, peletizador, sistema GALA, zaranda, soplador y picadora
Línea de producción Blanco	<ul style="list-style-type: none"> Extrusora línea Aditivos y equipos periféricos: motor, calefactores, dosificadores, agitador, secador, peletizador, sistema GALA, zaranda, soplador y picadora Montacargas Cargador batería grúa Aires acondicionados sala tableros eléctricos Torre de enfriamiento Compresores de aire
Bodega producto terminado (BPT) y oficina Gerencia	<ul style="list-style-type: none"> Oficina Gerencia (computadores, aires acondicionados, iluminación, otros) Iluminación Bodega Cargador batería grúa eléctrica BPT TOPLAB
Laboratorio	<ul style="list-style-type: none"> Extrusoras de desarrollo Otros equipos de control de calidad
Bodega	<ul style="list-style-type: none"> Bodega de materias primas Planta de reciclaje Oficinas El Olivo Vestidor 2

Fuente: Elaboración propia

Para efectos de este estudio se considerarán los datos obtenidos del medidor principal, que abastece todos los procesos de producción y también se usarán los datos obtenidos desde Wenu Work a excepción del medidor llamado “Tablero Distribución” ya que este mide el consumo de las extrusoras 1, 2 y otros equipos como iluminación, edificio administrativo, entre otros, por lo que no es posible usarlos para el análisis. Además, equipos o sistemas que

no están considerados dentro de los medidores WENU WORK son: línea 8, torres de enfriamiento líneas colores. Los datos de consumo de los últimos 3 años se presentan en la Tabla n°14. En la Tabla n°15 se presentan consumos del año 2023 por medidor y en la Tabla n°16 los consumos de energía eléctrica por línea productiva.

Tabla 14: Consumos energía eléctrica medidor "Principal"

2021	2022	2023
3.477.807 kWh	3.392.926 kWh	3.188.330 kWh

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Consumos energía eléctrica por medidor (kWh)

Mes	Consumo ENEL 3899	Consumo ENEL 3981	Consumo ENEL Total
ene-23	189.786	4.317	194.103
feb-23	246.937	3.912	250.849
mar-23	300.711	4.488	305.199
abr-23	258.775	4.725	263.500
may-23	289.566	5.469	295.035
jun-23	273.420	5.955	279.375
jul-23	284.632	6.638	291.270
ago-23	319.131	5.727	324.858
sep-23	259.698	5.992	265.690
oct-23	287.723	6.866	294.589
nov-23	290.159	6.023	296.182
Dic-23	187.792	5.988	193.780
TOTAL	3.188.330	66.100	3.254.430

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Consumos energía eléctrica por línea de producción 2023

MES	L3	L4	L5	L6	L7	Blanco	Aditivo	Total
dic-22	13.670	12.930	12.060	17.880	44.810	47.980	16.010	196.590
ene-23	3.000	3.960	6.260	4.020	11.710	59.010	31.420	142.685
feb-23	16.830	15.480	21.550	14.950	45.640	20.480	29.480	194.310
mar-23	13.900	20.790	20.050	19.710	40.250	48.570	38.450	234.310
abr-23	10.070	14.920	9.970	14.080	36.060	58.100	32.600	198.110
may-23	16.890	16.960	23.490	16.040	40.270	62.450	13.560	219.020
jun-23	13.920	17.020	13.320	17.080	27.010	57.880	35.170	206.865
jul-23	13.880	5.240	17.100	17.720	19.110	52.210	39.620	188.905
ago-23	13.240	11.760	15.140	15.050	26.560	53.980	34.800	195.595
sept-23	15.700	12.820	18.820	14.580	32.080	48.130	25.330	197.575
oct-23	15.360	19.270	15.850	16.520	28.780	52.720	42.400	218.995
nov-23	14.340	13.980	19.080	8.560	34.610	44.260	31.350	190.740
dic-23	12.720	13.680	13.110	8.920	30.560	12.350	22.440	144.050
TOTAL	159.850	165.880	193.740	167.230	372.640	570.140	376.620	2.331.160

Fuente: Wenu Work

4.2.4 Detección de fallas, perdidas y oportunidades de mejora

- **Detención extrusora por falla:** las fallas que detienen el proceso productivo, es decir, detienen al menos el motor del tornillo y apagan los calefactores, constituyen una ineficiencia en términos de uso de energía eléctrica ya que el peak de consumo de corriente se genera en el set up: encendido de motor y temperaturas de calentamiento. Se entiende entonces que retomar las condiciones de set up determinado requiere de un esfuerzo de uso de energía eléctrica importante. Las fallas más pueden venir de diferentes orígenes: proceso, calidad o mantenimiento.
- **Set up:** previo a la operación de cada extrusora, se requiere un proceso de pre-calefacción para alcanzar las temperaturas de set up. Se identificó que no está definido por procedimiento cual es el tiempo ni temperatura de pre-calefacción por lo que se presume, en algunos casos, un uso innecesario e ineficiente de energía eléctrica.
- **Filtraciones y pérdidas de agua desde batea:** el sistema de canoas para enfriamiento presenta fallas esporádicas de pérdidas de agua, principalmente por la falta de capacidad de la bomba para retornar el agua hacia las torres de enfriamiento. También

se presentan fallas por el flotador ya que al no cortar el flujo de agua se rebalsa generando la perdida. También se identifican fugas por la falta de corte de las válvulas.

- **Rebales en torres de enfriamiento:** Se evidencian esporádicos derrames de agua por rebalse desde las torres de enfriamiento, principalmente por falla en los sensores de corte por nivel o en algunos casos se adiciona manualmente.
- **Falta de control sistemas de vacío:** Actualmente el sistema de vacío es abastecido por el agua de las torres de enfriamiento, por tanto, funcionan con agua blanda. El sistema de vacío requiere de un sello permanente de agua y no está definido o estandarizado ni se cuenta con instrumentación que permita definir cuánta agua debe utilizarse, por lo tanto, depende del operador el flujo de agua utilizada y que luego directamente es eliminada ya que estos sistemas no tienen recirculación. Además de la perdida de agua directa se identifica que al usar agua blanda aumenta el consumo y generación por tanto el rechazo y también encarece el proceso.
- **Perdida de agua por retro lavado ablandador de agua:** el sistema de ablandador de agua requiere periódicos retro lavados de resina en su estanque interno, generando un rechazo de agua que actualmente no es aprovechada. Este rechazo es de aproximadamente un 7% respecto al consumo total de agua del equipo.

4.3 ANALIZAR

4.3.1 Análisis uso de agua

Considerando la ausencia de medidores en el consumo del agua obtenido desde el pozo de agua subterránea, se decide realizar un análisis solo considerando el proceso productivo de las líneas de colores cuya fuente de agua proviene de la fuente llamada “Principal”.

Para medir la eficiencia del consumo de agua se establece el indicador llamado “Uso intensidad de agua” (Tabla n°17), el cual relaciona las unidades producidas y el consumo de agua, es decir, y en este caso, se determina cuánta agua es necesaria para fabricar una tonelada de producto. En la Figura n°15 se muestra el indicador para los años 2021-2023.

Tabla 17: Determinación indicador "Intensidad uso del agua"

Año	Agua consumida medidor Principal	Toneladas fabricadas líneas de color	Intensidad uso del agua (m3/ton)
2021	20.520	2.319	8,84
2022	21.000	2.029	10,34
2023	19.655	1.862	10,55

Fuente: Elaboración propia

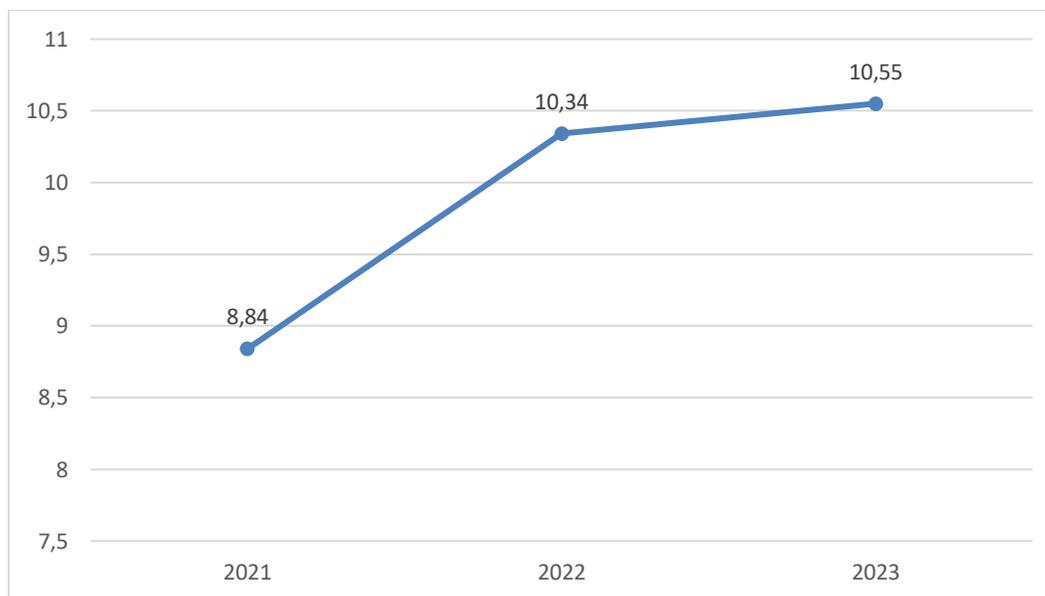


Figura 15: Gráfico indicador uso intensidad del agua período 2021-2023

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con este análisis se determina que en el año 2023, esta fábrica requirió de 10,55 metros cúbicos de agua para fabricar una tonelada de producto, por lo que su eficiencia en el uso de este recurso disminuyó en un 19% comparado al año 2021. Esta baja en la eficiencia está impulsada principalmente por una baja en la productividad, puesto que se fabricaron menos kilos y con consumos de agua relativamente parejos respecto a años anteriores.

Por otra parte, podemos apreciar en la Tabla n°18 y Figura n°16 que del agua proveniente de la fuente "Principal", el área de Producción consume el 83% para sus procesos de fabricación y el 17% restante es usado en consumos humanos: baños, vestidores, duchas, comedor.

Tabla 18: Distribución general consumos de agua medidor "Principal"

Consumo total de agua medidor "Principal"	Consumo de agua para Producción líneas Color	Consumo de agua para necesidades humanas*
19.655 m3	16.401 m3	3.254 m3

*se considera que el 80% de la dotación utiliza agua proveniente de esta fuente. El resto del personal utiliza habitualmente las dependencias que cuentan con otras fuentes de agua.

Fuente: Elaboración propia

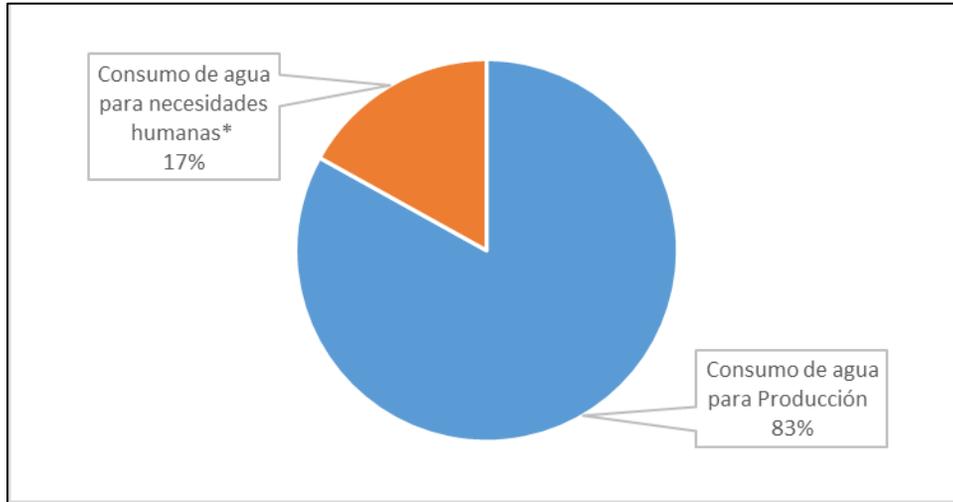


Figura 16: Gráfico distribución consumo de agua medidor "Principal"

Fuente: Elaboración propia

Considerando todos los consumos estimados y desestimando perdidas no contempladas o no identificadas en este estudio, la distribución del uso o consumo de agua se describe en la Tabla n°19.

Tabla 19: Consumo de agua por equipo medidor "Principal" 2023

Consumo	Metros cúbicos	%
Canoas de enfriamiento	7.063	36
Consumo sistemas de vacío	5.927	30
Consumo humano	4.068	21
Rechazo ablandador de agua	1.148	6
Perdida de agua por evaporación torres de enfriamiento	570	2
Sistema GALA	465	3
Uso de agua lavador de gases	414	2

Fuente: Elaboración propia

En la Figura n°17 y usando el método de Pareto, se presentan los principales consumos de agua del medidor “Principal”, identificando que el agua de canoas, vacíos y consumo humano representan el 80% del consumo.

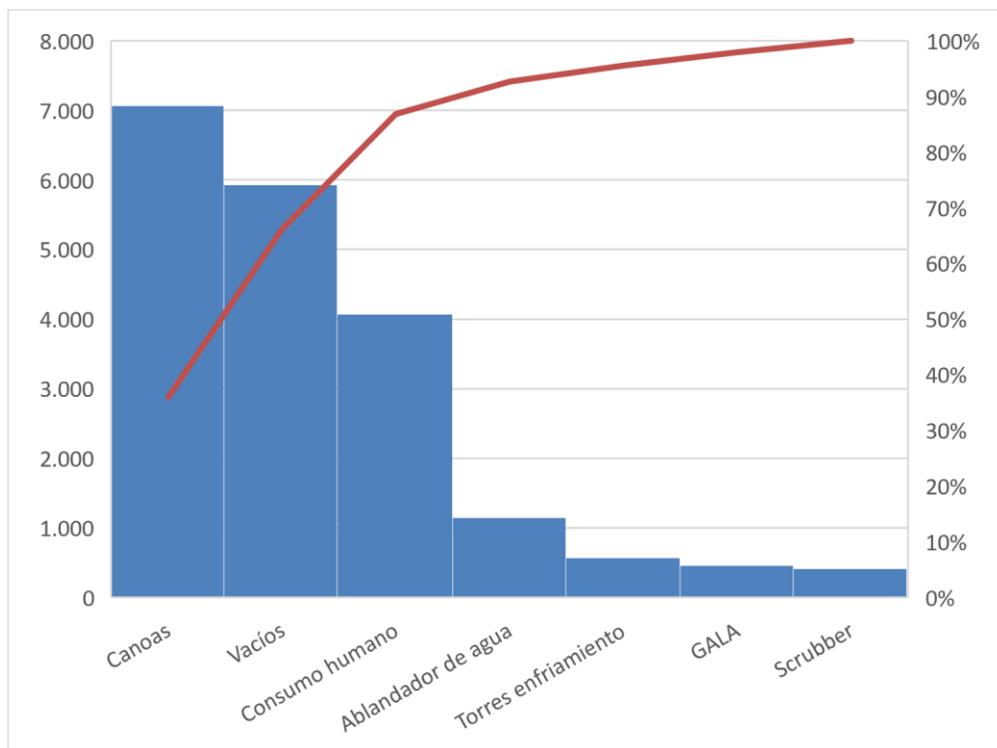


Figura 17: Gráfico consumos de agua medidor "Principal" 2023
Fuente: Elaboración propia

Con este análisis se concluye que:

1. Esta fábrica, de acuerdo con los datos de los últimos 3 años, requiere, en promedio, 9,91 m³ de agua para fabricar una tonelada de producto.
2. Los mayores consumos de agua corresponden al funcionamiento de las canoas de enfriamiento de tallarines plásticos y sistemas de extracción por vacío, los cuales en conjunto consumen el 72% del agua aproximadamente. Por lo tanto, el plan de mejora debe estar apuntado, principalmente, a estos dos sistemas.
3. Al no contar con medidores de agua en todas las fuentes de agua y principales consumos, se dificulta la obtención de datos y análisis, privando de la oportunidad de obtener mayores conclusiones.

Usando el método de Ishikawa (Figura n°18) se determinan las principales causas del alto consumo de agua en canoas de enfriamiento y sistemas de vacío.

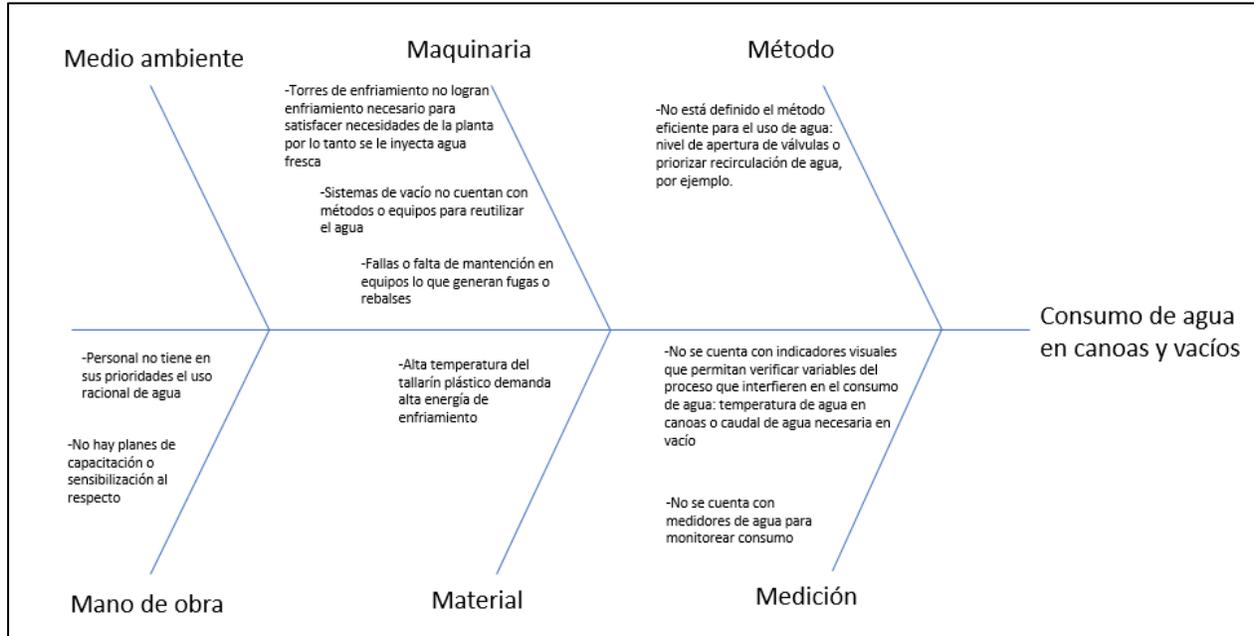


Figura 18: Diagrama de Ishikawa consumo de agua
Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Análisis uso de energía eléctrica

Para efectos de análisis de datos de este estudio, se considerará la información recolectada desde el medidor llamado “Principal” y la información entregada por Wenu Work.

Como lo indica la Tabla n° 20, en el año 2023 se consumieron 3.244 MWh, siendo un 64% de esta energía consumida por los equipos utilizados para fabricar productos en las líneas 3, 4, 5, 6, 7, Blanco, Aditivo y Laboratorio control de calidad. En la Figura n°19 se presenta gráficamente el consumo de energía eléctrica.

Tabla 20: Distribución general consumo energía eléctrica medidor "PRINCIPAL"

Año	Consumo ENEL medidor "Principal"	Consumo equipos líneas productivas
2023	3.244 MWh	2.100 MWh

Fuente: Elaboración propia

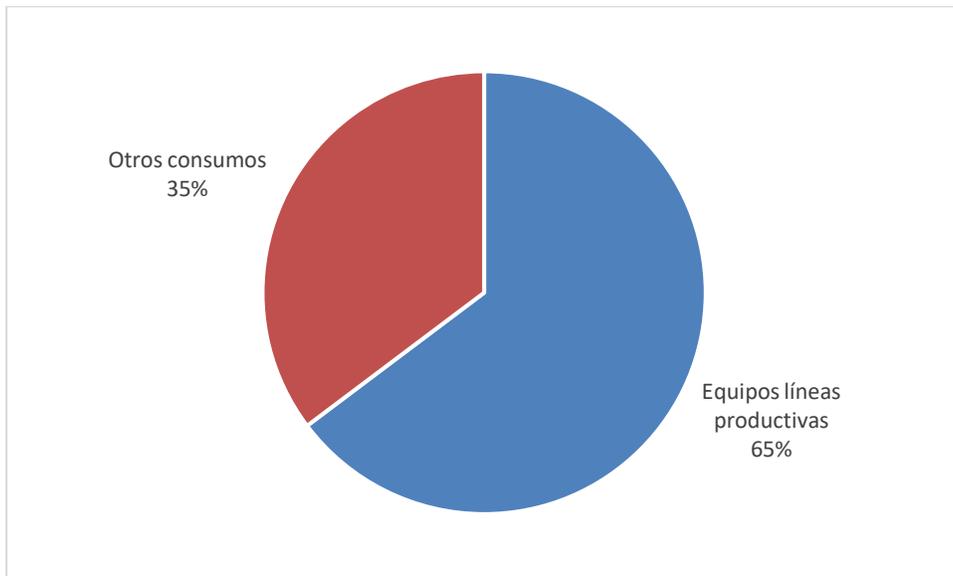


Figura 19: Gráfico distribución consumos energía eléctrica medidor "Principal" 2023
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la información obtenida desde Wenu Work, se determina que los principales consumos están distribuidos como lo muestra la Figura n°20.

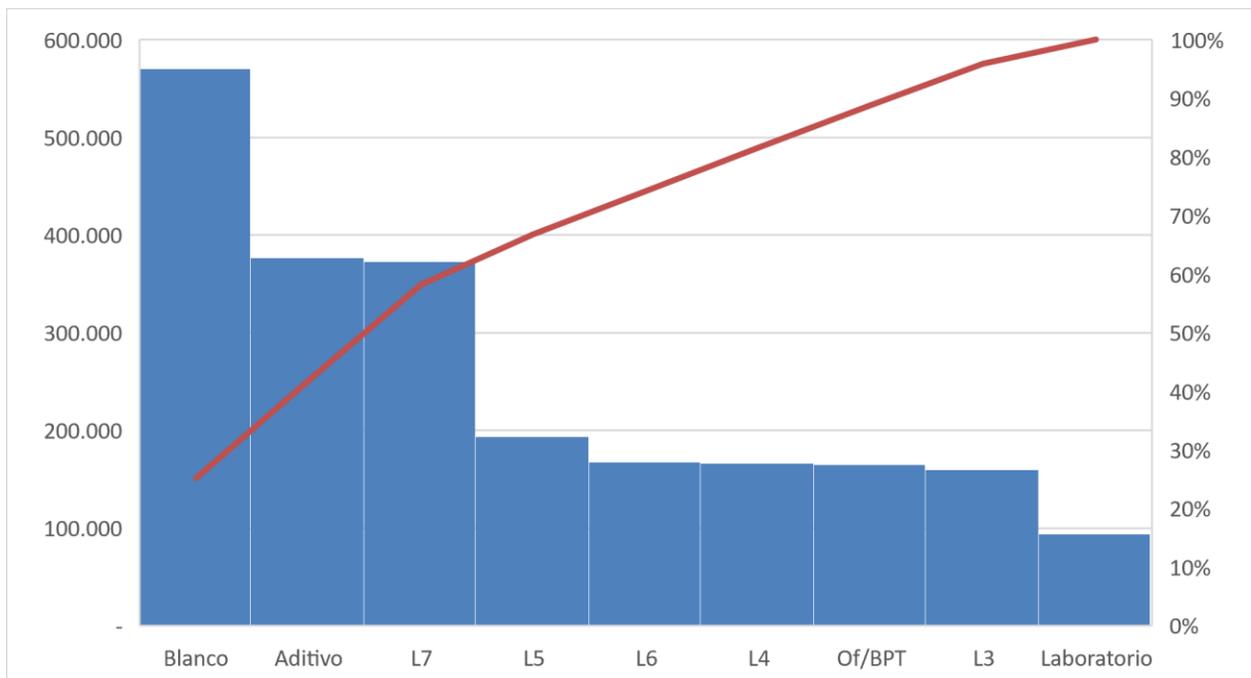


Figura 20: Gráfico consumos energía eléctrica por línea de producción 2023
Fuente: Elaboración propia

Para medir la eficiencia del uso de la energía eléctrica se define el indicador “uso de intensidad energía eléctrica”, el cual relaciona el consumo de energía eléctrica y las unidades fabricadas, es decir, cuanta cantidad de kWh se requieren para la fabricación de 1 tonelada. En la Tabla 21 se muestra el indicador general de la fábrica en los últimos 3 años y considerando solo los datos recolectados desde el medidor llamado “Principal” de ENEL. En al año 2023, esta fábrica requirió de 570,16 kWh de energía eléctrica para fabricar una tonelada de producto.

Tabla 21: Determinación indicador uso intensidad energía eléctrica período 2021-2023

Año	Energía eléctrica consumida medidor Principal (kWh)	Toneladas fabricadas	Intensidad uso energía eléctrica (kWh/ton)
2021	3.447.807	7.273	474,05
2022	3.406.632	6.261	544,10
2023	3.188.330	5.592	570,16

Fuente: Elaboración propia

En la Figura n°21 se muestra el gráfico del indicador de uso intensidad para los años 2021-2023.

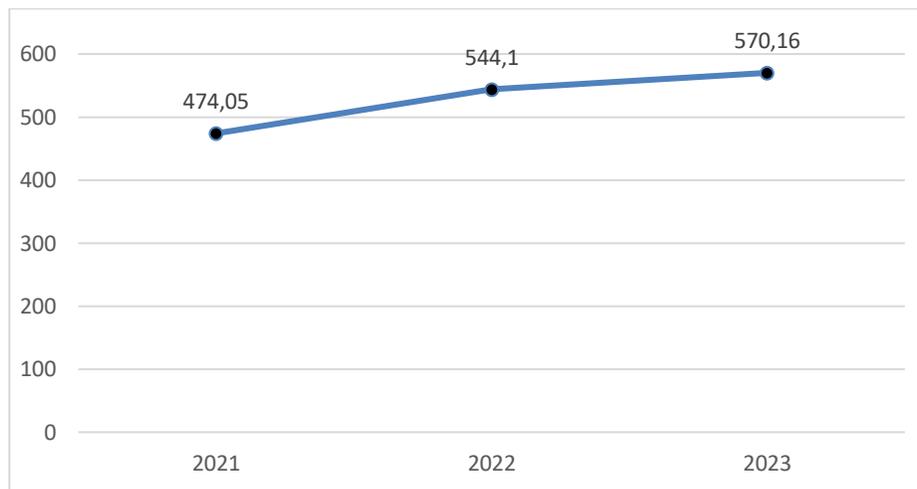


Figura 21: Gráfico indicador uso intensidad energía eléctrica período 2023

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con este análisis y como la eficiencia está determinada por el uso de recursos para la obtención de un producto o servicio, se identifica que en el año 2023 la eficiencia disminuyó en un 20% comparado al año 2021, impulsado principalmente por una baja en la

productividad ya que el consumo de energía eléctrica ha sido relativamente parejo en estos últimos 3 años, incluso siendo el 2023 el año con menos consumo.

Con los datos disponibles también se obtuvo la eficiencia con el indicador “Uso intensidad eléctrica” para cada línea productiva en el año 2023 como lo indica la Tabla y Figura n°22.

Tabla 22: Determinación indicador uso intensidad energía eléctrica por línea de producción 2023

Línea productiva	Consumo eléctrico kWh	Toneladas fabricadas	Uso intensidad eléctrica
3	159.850	252	590,52
4	165.880	271	542,78
5	193.740	306	701,29
6	167.160	276	237,80
7	372.640	703	530,12
Blanco	570.140	2386	238,93
Aditivo	376.620	1.343	280,39

Fuente: Elaboración propia

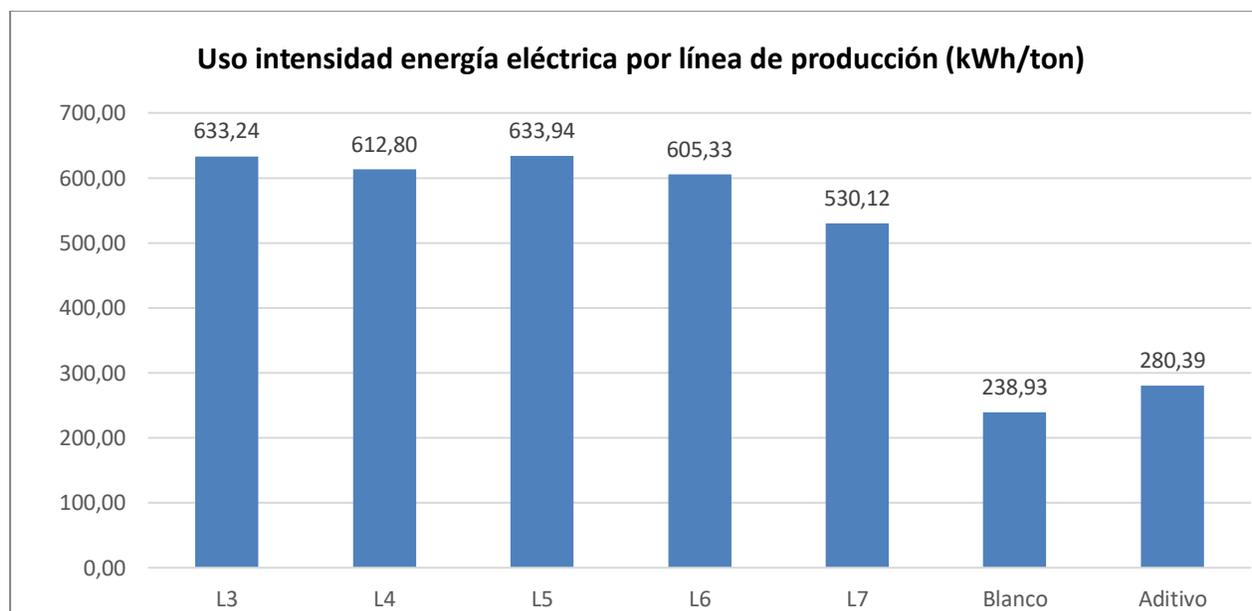


Figura 22: Gráfico indicador uso intensidad energía eléctrica por línea de producción 2023

Fuente: Elaboración propia

Se concluye que la línea productiva con mejor eficiencia es la línea Blanco que requirió 238,93 kWh para fabricar una tonelada de producto. Las líneas de color 3, 4, 5 y 6 presentan un indicador similar con un promedio de 621,33 kWh/ton. Se destaca la ineficiencia de la línea 7, la cual consumió la misma energía eléctrica que la línea Aditivos, sin embargo, produjo 50% menos.

Respecto al análisis de datos de fallas obtenidas desde VESAT, se realiza un análisis e interpretación de datos obteniendo conclusiones que permiten relacionar estos indicadores con la eficiencia de energía eléctrica ya que cada incidencia mencionada en este análisis genera una detención del proceso productivo, y para la reanudación de la máquina se requiere alcanzar nuevamente los parámetros de set up, por ende un sobreconsumo de energía eléctrica.

Para el año 2023, la organización definió metas para los indicadores TMEF y TMPR, los resultados de la performance fueron positivos ya que el TMEF estuvo por debajo de la meta en 3 puntos y el TMPR estuvo por encima de la meta solo por una décima. El detalle se entrega en la Tabla n°23. Estos indicadores señalan que, a noviembre 2023, no se han logrado alcanzar las metas ya que el TMEF está 3 puntos por debajo y el TMPR 1 décima por encima.

Tabla 23: Cumplimiento indicadores de mantenimiento 2023

TMEF		TMPR	
Meta	Resultado	Meta	Resultado
47	44	2,8	2,9

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las fallas de mantenimiento (Figura n°23), el 50% de las fallas están centradas en dos equipos específicos del proceso: dosificadores y peletizadoras. Siendo los dosificadores la falla más repetitiva con un 30%. Para completar el 80% se suman los equipos: sistema de enfriamiento, calefactores y cortes externos de energía.

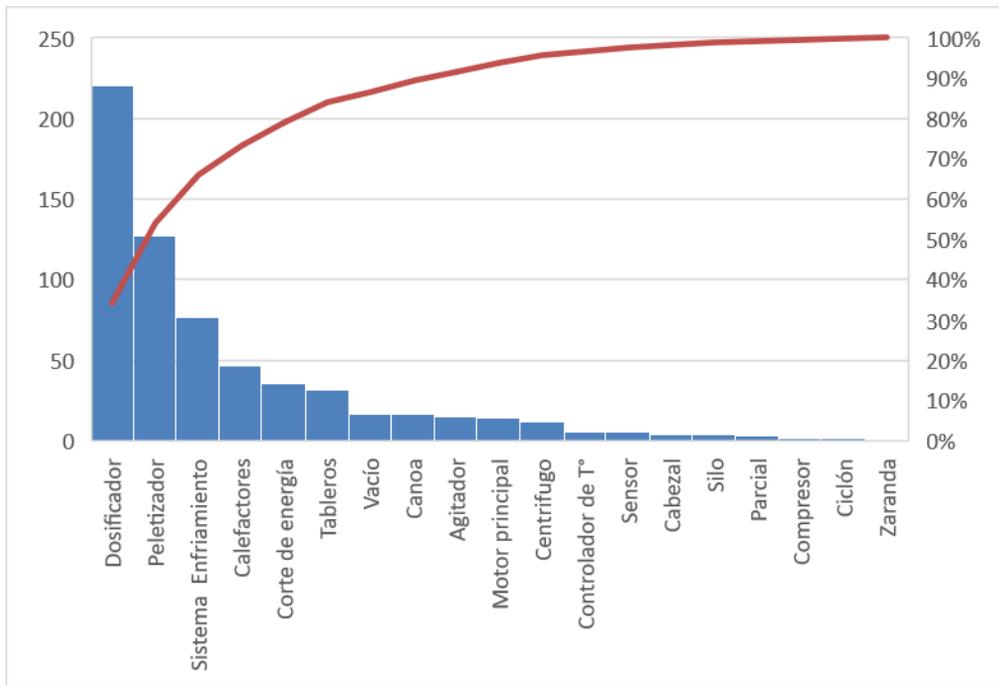


Figura 23: Gráfico incidencias por fallas de mantenimiento
 Fuente: Elaboración propia

Respecto a incidencias relacionadas a Calidad (Figura n°24), influyen directamente en el proceso productivo ya que al tener rechazos por el área de control de calidad la maquina debe detenerse hasta redefinir las condiciones.

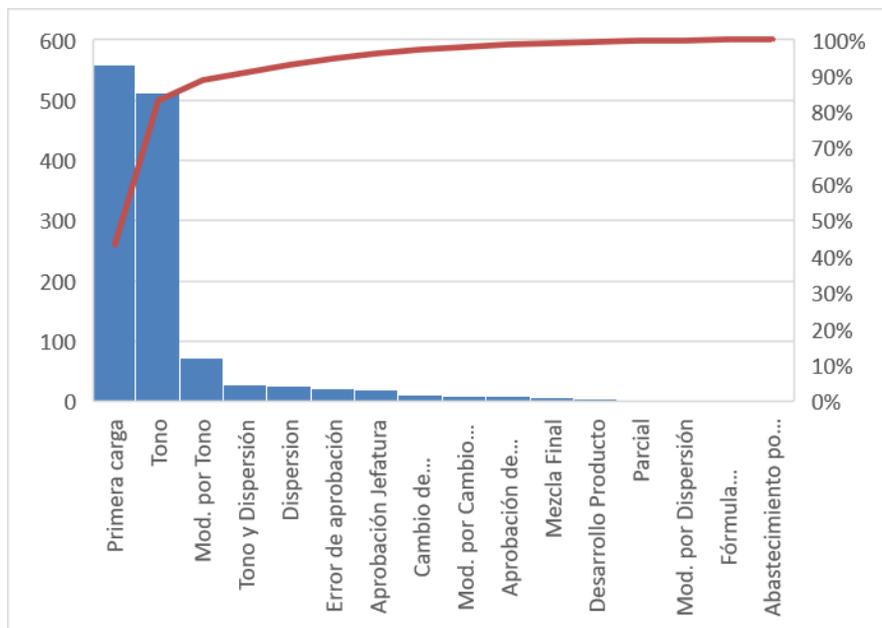


Figura 24: Gráfico por incidencias de calidad
Fuente: Elaboración propia

Respecto a incidencias relacionadas al proceso (Figura n°25), se identifica que la inestabilidad de las variables del proceso productivo como la presión, temperaturas, entre otras es la principal causa de detención de línea. Lo siguen las incidencias por tolvas tapadas y problemas de corte de pellet.

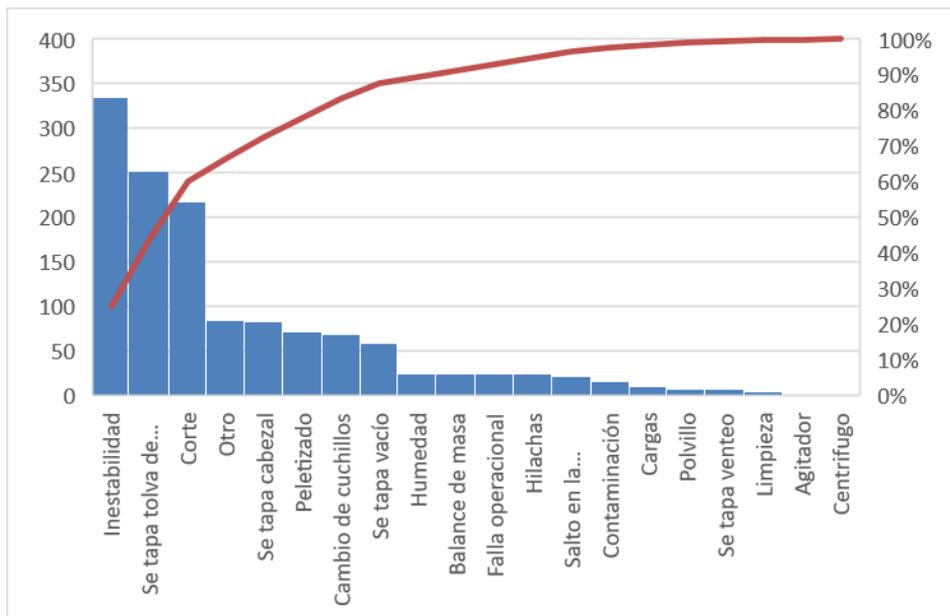


Figura 25: Gráfico por incidencias de proceso
Fuente: Elaboración propia

Respecto a incidencias y tiempos relacionados al set up, en la Tabla n°24 se presentan datos de horas invertidas en la preparación de los equipos

Tabla 24: Incidencias y horas de set up

Incidencia	N° de incidencias	Horas de duración
Primera carga	729	817
Reanudación	543	541
Apagado de máquina	121	78

Fuente: Elaboración propia

Se concluye que la incidencia con mayor uso de tiempo y por ende consumo de energía, es la primera carga, correspondiente al tiempo necesario de pre-calefacción mientras el operador realizar labores de preparación de carga: resina, pigmentos y otros.

Con todo este análisis respecto a datos de consumo de energía eléctrica, datos producción y mantenimiento, se concluye que:

1. Esta fábrica, y de acuerdo con los datos de los últimos 3 años, requiere en promedio 529,44 kWh de energía eléctrica para fabricar una tonelada de producto.
2. De los últimos 3 años, el 2023 ha tenido la más baja performance en eficiencia de energía eléctrica, atribuible principalmente a una fuerte baja en la demanda y fabricación de productos.
3. Los equipos de producción consumen aproximadamente el 64% de la energía eléctrica de la fábrica. Se asume que el otro 36% está compuesto por equipos de servicio, iluminación, servidores, climatización, entre otros.
4. La línea productiva con la mejor eficiencia de uso eléctrico es la línea Blancos, la cual requiere solo 238,93 kWh por cada tonelada fabricada.
5. Las líneas de color 3, 4, 5 y 6 presentan un indicador similar con un promedio de 621,33 kWh/ton.
6. Respecto al análisis de fallas e incidencias desde VESAT, que presumen un sobreconsumo de energía eléctrica para alcanzar el set up, son:

- Mantenimiento: Fallas en equipos dosificadores de materia prima y peletizadoras
 - Calidad: Rechazos de control por primera carga y tono disconforme
 - Proceso: inestabilidad del proceso, tolvas tapadas y corte de pellet.
 - Set up: tiempo invertido en primera carga y reanudación de proceso.
7. Disminuir el consumo eléctrico, aumentar los kilos fabricados y disminuir las fallas o incidencias son claves para mejorar la eficiencia.

Usando el método de Ishikawa (Figura n°26) y con una mirada general de la problemática, se determinan las principales causas de la baja eficiencia en el uso de energía eléctrica en esta fábrica.

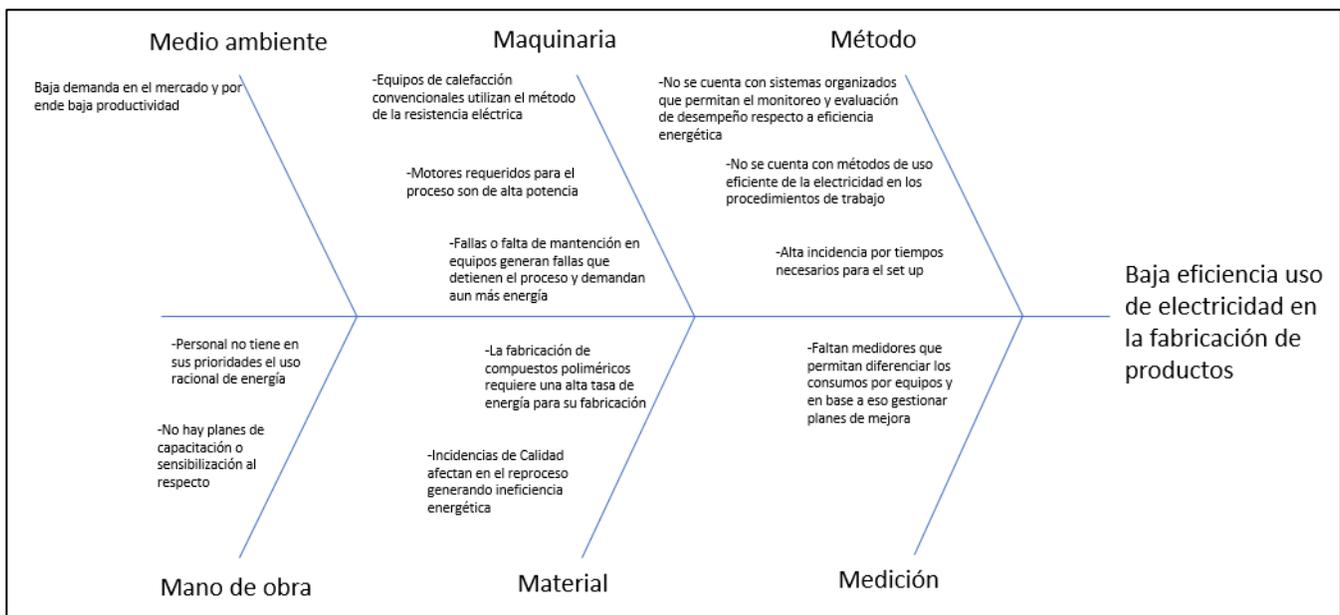


Figura 26: Diagrama de Ishikawa por ineficiencias en el uso de energía eléctrica
Fuente: Elaboración propia

En adicional, y siguiendo los lineamientos de la guía para la implementación de sistemas de gestión de energía basado en ISO 50.001 y patrocinada en Chile por la Agencia de Sostenibilidad energética, se realizó un proceso de planificación energética resumen (Figura n°27) basada en el esquema propuesto por dicha norma.

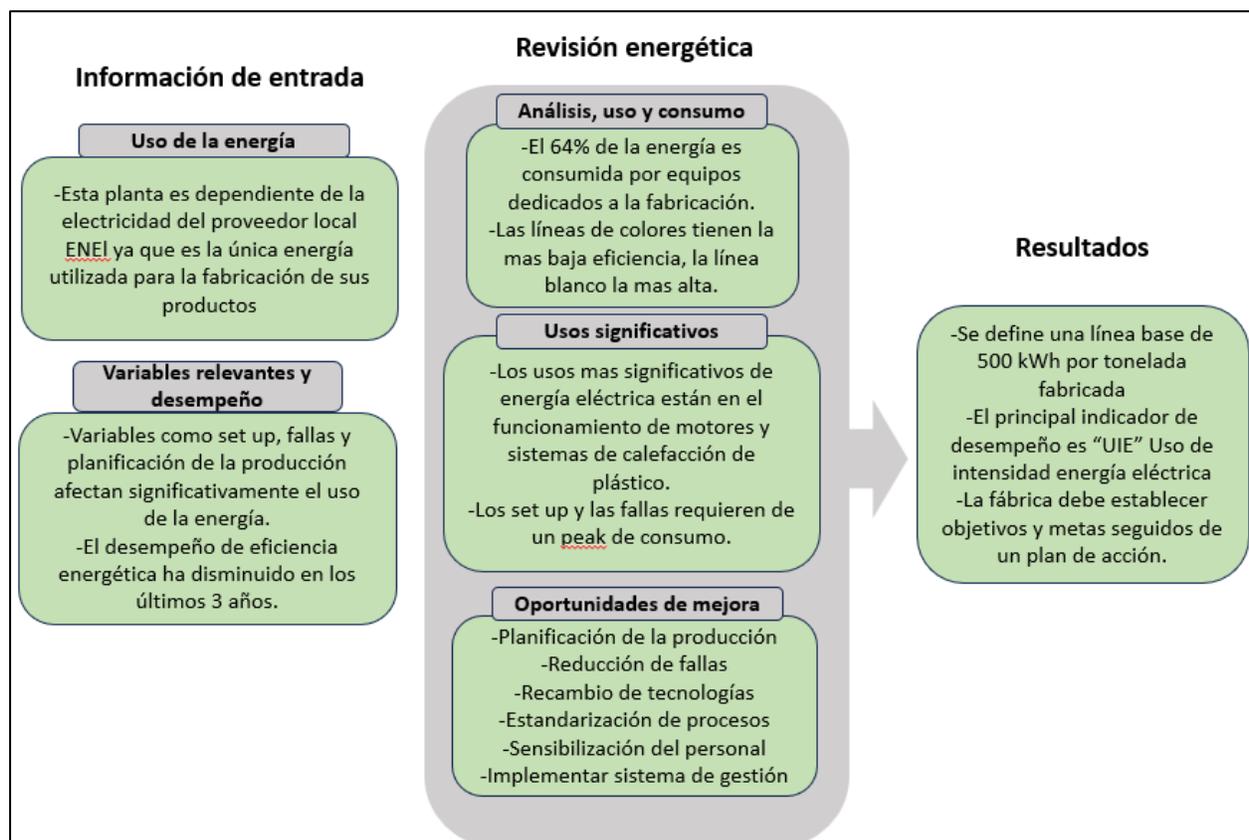


Figura 27: Diagrama proceso de planificación energética
Fuente: Elaboración propia

4.4 MEJORAR

4.4.1 Consumo de agua

Tras el análisis destacan como principales consumos las bateas para el enfriamiento de tallarines plásticos y los sistemas de vacío para la extracción de gases. Las causas técnicas principales se describen en la Tabla n°25.

Tabla 25: Resumen principales causas ineficiencia uso de agua

Consumo	Causas principales
Canoas de enfriamiento de tallarines plásticos	Inyección de agua fresca para satisfacer necesidades de enfriamiento que, eventualmente, las torres no pueden cubrir. No se cuenta con indicadores visuales de t° en las canoas para determinar con certeza la necesidad de enfriamiento Fallas o falta de capacidad en ciertos equipos complementarios como bombas y sensores que permitan la recirculación del agua evitando el rebalse de canoas
Sistemas extracción de gases por vacío	No se cuenta con sistemas que puedan reutilizar el agua utilizada No se cuenta con instrumentos que puedan indicar visualmente que el flujo de agua inyectado es el necesario, ni más, ni menos.

Fuente: Elaboración propia

Considerando este análisis causal, a continuación, se presenta una serie de mejoras técnicas que podrían reducir el consumo de agua en esta fábrica:

- **Evaluar desempeño de transferencia energética torres de enfriamiento.**

Para evitar la inyección de agua fresca a un circuito que, en teoría, está diseñado para ser cerrado, debe realizarse un estudio de transferencia energética para conocer la real performance de las actuales torres de enfriamiento. La fábrica ha agregado nuevas líneas de producción, cambios en procesos y ha aumentado su producción en los últimos 10 años por lo tanto es posible que el sistema de enfriamiento no satisfaga las necesidades actuales. Equipos como chiller o dry cooler pueden ser una alternativa para mejorar la eficiencia. Estos equipos pueden ser usados como complemento a las torres de enfriamiento existente. Mejorando la eficiencia de enfriamiento disminuirá la inyección de agua fresca y por tanto el sistema sería cerrado, asumiendo solo las pérdidas de agua por evaporación y tratamiento por dureza, conductividad y otros parámetros. Se estima que una medida de este tipo puede ahorrar el 100% de agua fresca adicional inyectada a las canoas. Con los antecedentes manejados en este estudio no es posible determinar el ahorro real con una mejora de este tipo, pero si se debe mantener en consideración que el consumo de agua en el uso de bateas asciende a 7.882 m³ de agua al año siendo el principal proceso de consumo de agua.

- **Implementación de termómetros en canoas de enfriamiento**

Dependiendo del tipo de resina plástica usada en el proceso variará la temperatura de derretimiento, por tanto, a mayor temperatura mayor necesidad de enfriamiento del agua en las canoas. Actualmente no se cuenta con indicadores visuales que permitan determinar si la temperatura del agua es la óptima para lograr el enfriamiento necesario, por lo tanto, cada operador de acuerdo a su experiencia y controles de proceso decide cuánta agua fresca agregar generando, eventualmente, un uso excesivo de agua. Para evitar que la inyección de agua fresca quede a criterio del operador de turno, se recomienda el uso de termómetros que midan la temperatura del agua en la batea determinando la necesidad o cantidad de recambios de agua para mantener la temperatura óptima.

- **Mejoramiento bombas de recirculación agua de canoas**

De acuerdo a la información obtenida de personal de la planta más inspecciones en terreno, se identificó que una de las pérdidas de agua corresponde al rebalse de las canoas debido al gran caudal de inyección para enfriar y que la bomba de recirculación no logra retornar hacia las torres de enfriamiento. Se recomienda revisar el cálculo de la necesidad de recambios de agua y verificar si las actuales bombas cumplen con ese requerimiento. De no satisfacer esa necesidad se recomienda aumentar el tamaño de la bomba para evitar las fugas por rebalse.

- **Evaluar implementación sistema circuito cerrado aguas del sistema de vacío.**

Actualmente el agua utilizada para los sellos del sistema de vacío no es reutilizada, por lo que se aprecia aquí una oportunidad de ahorro. El agua utilizada en este proceso se calienta por lo que para su reutilización requiere de un sistema que logre enfriar de forma autónoma el agua utilizada ya que, por requerimientos de calidad, no es compatible usar esta agua en el circuito de enfriamiento de los tallarines. Se recomienda evaluar el uso de sistemas de enfriamiento y filtración de agua utilizada en los sistemas de vacío de tal forma que el agua pueda recircular. Se espera que con una medida como esta se pueda reducir al menos al 20% el uso del agua para este propósito, es decir, bajar desde 5.927 m³ a 1.500 m³ aproximadamente. Equipos intercambiadores de calor para bombas de vacío, actualmente tienen un costo aproximado de 4 millones de pesos (Tabla n°26), para cubrir todos los sistemas de vacío se requeriría de al menos 6 equipos por lo que la inversión inicial

aproximada es de 24 millones de pesos. Considerando que actualmente el m3 de agua cuesta \$1.100 aproximadamente, se espera que el retorno de la inversión sea de aproximadamente 6 años.

Tabla 26: Detalle cotización recirculación agua sistema vacío

Item	DESCRIPCION	PRECIO	FOTO REFERENCIAL DEL EQUIPO
1	BOMBA DE VACIO DE ANILLO LIQUIDO, MARCA BSI, DE 4 KW, 1.450 RPM MOD. MB 210/80	1.450.000	
2	INTEGRACION DE RECIRCULACION PARCIAL DE AGUA DE SERVICIO KRVS SIN INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA EQUIPO MB 210/80.	1.986.991	
3	INTERCAMBIADOR DE CALOR PARA SISTEMA DE RECIRCULACION PARCIAL 210/80 (OPCIONAL)	897.138	
PRECIO NETO TOTAL INTEGRACION		4.334.129	

Fuente: Sobitec

- **Implementación de caudalímetros en alimentación de agua sistemas de vacío**

Actualmente, depende del operador la cantidad de agua utilizada para mantener el sello en los sistemas de vacío, por lo que, instalando un caudalímetro en cada línea de alimentación de agua de las bombas de vacío (letra F de la imagen n°28), se podrá conocer visualmente si el agua utilizada satisface la necesidad justa del equipo.

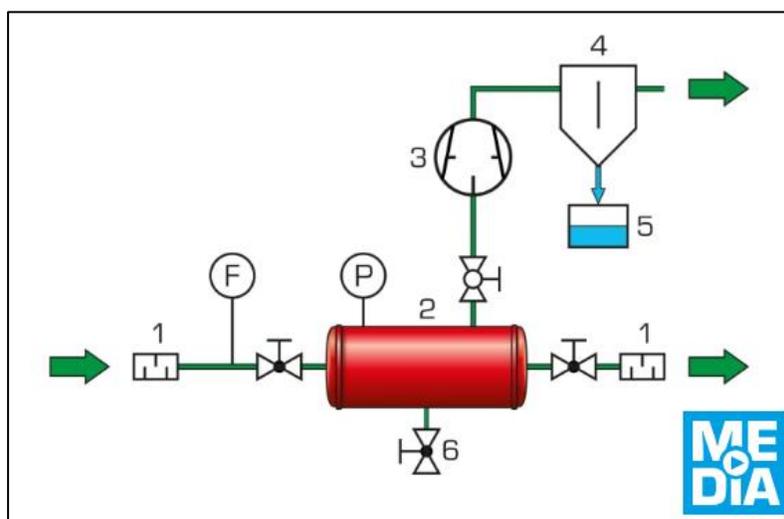


Figura 28: Imagen referencial sistema extracción de vacío

Fuente: Gunt.de

Otras acciones, que no apuntan a las principales fuentes de consumo, son:

- **Instalar medidores de agua**

Para mejorar la precisión de los datos de consumo se recomienda implementar medidores de agua en los puntos críticos o principales procesos productivos de la planta. Se sugiere que existan medidores en los siguientes puntos de consumo: salida del ablandador, abastecimiento bombas de vacío, pozo de agua, retornos de agua torres de enfriamiento, entre otros.

- **Independizar abastecimiento de agua para sistemas de vacío**

Actualmente los sistemas de vacío utilizan agua blanda proveniente de las torres de enfriamiento y técnicamente no es necesario que estos equipos utilicen agua blanda. Los sistemas ablandadores de agua tienen un rechazo del 7% del agua utilizada ya que debe realizar procesos de limpieza y regeneración interna, por lo tanto, al usar agua potable sin tratamiento en los sistemas de vacío, sería posible evitar el agua de rechazo de los sistemas ablandadores que, de acuerdo a los cálculos de este estudio, posiblemente podría evitar el 38% del agua de rechazo, es decir, aproximadamente 446 m³.

- **Reutilizar rechazo ablandador de agua**

Actualmente el agua de rechazo es directamente eliminada, por lo que se sugiere estudiar la reutilización de esta agua. Una alternativa podría ser la acumulación en un estanque, mezclarla con agua potable y utilizar, por ejemplo, en los sistemas de vacío. De concretar una solución como esta se podría aprovechar el 100% de las aguas de rechazo, que en el 2023 fue de 1.148 m³.

- **Evaluar mejoras sistemas GALA**

Actualmente, los operadores de acuerdo a su criterio inyectan agua fresca en la batea de agua de los sistemas GALA para mejorar la temperatura, luego por rebalse de la batea el agua se va perdiendo. Sin embargo, no cuentan con ningún instrumento que permita verificar la temperatura del agua y por tanto definir si requiere enfriamiento o no. Al instalar

termómetros visibles se podrá determinar si la inyección de agua fresca es necesaria o no. Por otro lado, se sugiere evaluar mejoras en el intercambiador de calor para garantizar que cumple con las necesidades de enfriamiento del agua. A su vez, se recomienda implementar mejoras que permitan mantener el agua limpia, libre de pellets o pigmentos, aumentando así el uso o reutilización del agua.

- **Mejoras en sistema de agua para consumo humano**

Replicar en toda la fábrica el uso de llaves de lavamanos con sensor de acercamiento y en las duchas reemplazar las llaves manuales por pulsadores tipo botón.

4.4.2 Consumo de energía eléctrica

Tras el análisis se determinó que la fábrica en los últimos 3 años ha disminuido su eficiencia en el uso de la energía eléctrica y de acuerdo con el análisis los principales consumos se encuentran en el funcionamiento de los motores y los calefactores para el derretimiento del plástico. Los motores, por necesidad técnica, son de alta potencia y los calefactores actúan bajo el principio de la resistencia eléctrica lo que los hace poco eficientes respecto al consumo de energía eléctrica y uso del calor. Otro de los factores que ha pegado fuertemente en la baja de la eficiencia en el consumo de energía eléctrica es la baja en la producción.

A continuación, se presentan mejoras técnicas que mejorarían la eficiencia del uso de la energía eléctrica en esta fábrica.

- **Evaluar recambio progresivo de motores**

Las tecnologías en eficiencia energética avanzan a paso rápido por lo que ya es posible conseguir motores más eficientes respecto al consumo, y así lo señalan normativas internacionales como la IEC 60034 de la Comunidad Europea que clasifica la eficiencia eléctrica de los motores: IE1, IE2 e IE3, siendo esta última la mejor respecto a eficiencia (UNE-EN 60034-30-1:2014). Dicho esto, se sugiere evaluar el recambio y actualización de motores dando prioridad a los más antiguos. De acuerdo a algunas estimaciones, realizada con un software de SIEMENS llamado SinaSave, para el caso de un motor convencional de 500 kW de potencia es posible ahorrar anualmente hasta 27 MWh por año (Figura n°29),

aproximadamente un 1,2% del consumo de la energía eléctrica de los equipos de producción. Este upgrade de tecnologías también podría aportar a la disminución de fallas y detención de líneas.

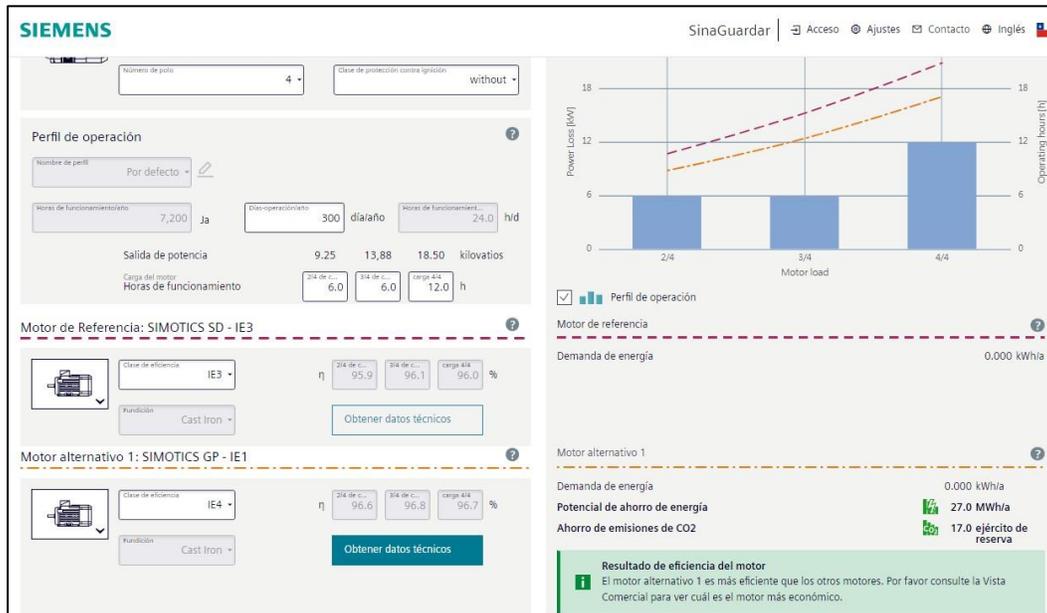


Figura 29: Imagen simulación cambio de motor
Fuente: SIEMENS

- **Evaluar cambio de tecnología para la calefacción o derretimiento del plástico**

Actualmente se utiliza la calefacción por resistencia eléctrica para el derretimiento del plástico, esta tecnología es poco eficiente desde el punto de vista del consumo energético así como del aprovechamiento de la energía ya que disipa mucho calor hacia el exterior. Para mejorar la eficiencia energética en este proceso de calefacción se propone evaluar el cambio al principio de la inductancia magnética, la cual se basa en que los campos magnéticos generan campos eléctricos (Martin & Blas, 2014.) usando bobinas eléctricas o cables en forma de espiral. Actualmente, los calefactores usados en la fábrica tienen potencias de entre 2.000 y 8.000 kW, al contrario, en los calefactores por inductancia magnética la potencia máxima es 2.000 kW, pero alcanzando las temperaturas requeridas. Se estima que el costo de inversión para cambiar el sistema de calefacción por resistencia a inductancia magnética en una extrusora es de aproximadamente 6 millones de pesos, y se estima que la reducción de consumo eléctrico puede disminuir en un 50%. Se recomienda considerar la

implementación de un piloto en la línea 5, la cual tiene la más baja eficiencia en el indicador “uso intensidad energía eléctrica”.

Otras acciones que pueden aportar al desempeño energético son:

- **Reorganizar los medidores Wenu Work**

De forma de obtener nueva data y más detallada respecto a principales consumos, se recomienda reorganizar los actuales medidores Wenu Work de tal modo obtener data que hoy no se tiene, como los consumos de energía eléctrica de motores y calefactores.

- **Aumentar controles para evitar detenciones por falla operacional**

Una de las fallas más recurrente es la detención por trabamiento del tornillo, la cual puede producirse por múltiples factores y es por eso que se requiere mejorar los controles de proceso para evitar que sucedan. Capacitación, supervisión y observación de proceso son algunas herramientas que deben considerarse.

- **Control de aire acondicionado**

Implementar sistemas de timer en circuitos con aire acondicionado para evitar el funcionamiento durante horas no laborales. Se recomienda también implementar campañas de sensibilización para el uso consciente y definiendo rangos de temperaturas de uso de acuerdo a la estación del año. En general se recomienda entre 24 y 26° Celsius en verano y 20 o 21° en invierno. (¿Cuál es la temperatura ideal del aire acondicionado?, ENEL, 2019)

- **Control de calentadores de agua para duchas**

Instalar timers en los sistemas de calefacción de agua para vestidores evitando el calentamiento excesivo del agua y en horarios que no se requiere. Mejorar el sistema de mezclado de agua caliente y fría de tal forma de evitar el uso de agua muy caliente. En general se recomienda el uso entre 36 y 38°C (Arturo, 2023).

- **Estudiar factibilidad técnica para la implementación de sistemas de generación eléctrica fotovoltaica**

Una alternativa, del punto de vista de reducción de costos, es la implementación de sistemas de autogeneración de energía como los sistemas fotovoltaicos. Usando un simulador de ENEL (Calculadora de paneles solares | Simula tu proyecto fotovoltaico, s. f.) y del Ministerio de Energía (Explorador solar, s. f.) se determinó que haciendo uso de la bodega de materia prima de la fábrica, la cual tiene aproximadamente 3.000 m² de superficie en techumbre, se estimó que podrían generarse al año 640 GWh, generándose un ahorro anual de aproximadamente 17 millones de pesos. En general estos proyectos tienen una tasa de retorno de 9 años (Universidad de Michigan - ACESOL, 2016).



Figura 30: Resultados simulación sistema fotovoltaico ENEL

Fuente: ENEL



Figura 31: Resultados simulación sistema fotovoltaico Ministerio de Energía
Fuente: Ministerio de Energía

- **Implementar sistema gestión de la energía**

A pesar de que esta fábrica no está obligada a la implementación de un sistema de gestión debido a que no califica de acuerdo al consumo energético (Del Congreso Nacional, s. f.- b) se recomienda adoptar un sistema de gestión de la energía para mejorar sistémicamente la eficiencia. Además, estos sistemas consideran otras energías como el diésel o el gas licuado por lo que se podría tener una mejora integral de la eficiencia.

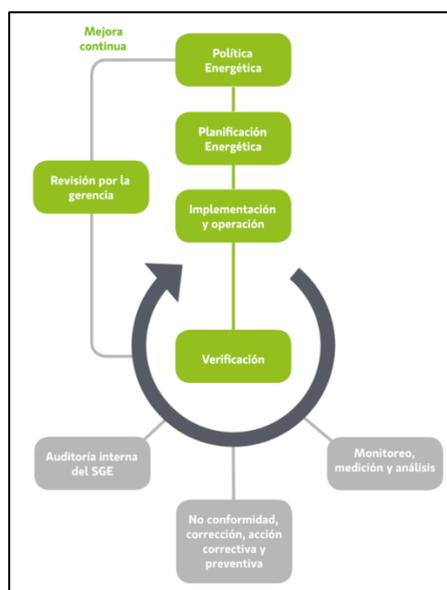


Figura 32: Diagrama resumen sistema gestión de energía
Fuente: Agencia chilena de sostenibilidad energética

4.4.3 Propuesta de mejoras generales

Se recomienda a modo general, evaluar la implementación de las siguientes medidas que apuntan a mejorar la eficiencia tanto del consumo de agua como del consumo de energía eléctrica.

- **Definir la eficiencia del agua y la energía como pilar estratégico de la compañía**

Para asegurar el éxito de la mejora de la eficiencia en términos de consumo de energía eléctrica y agua, así como otros propósitos, es óptimo que el compromiso y los lineamientos provengan desde la alta dirección, asegurando la disponibilidad de recursos y la mejora del desempeño. Definir objetivos y metas y desarrollar un plan con actividades claras, responsables y fechas es clave para alcanzar los resultados.

- **Robustecer el plan de mantenimiento preventivo y correctivo**

A fin de evitar detenciones de la línea productiva y minimizar fallas en los equipos claves, se recomienda robustecer el plan de mantenimiento preventivo poniendo foco en el análisis de falla. A priori y con la información recolectada en este estudio, las principales fallas ocurridas en el año 2023 que provocan detención de equipos y por ende generaron un derroche energético, fueron los dosificadores y sistema de calefacción. Del punto de vista del agua, se requiere mejorar, principalmente, la mantención de dispositivos de funcionamiento y sensores de nivel en sistemas de acumulación de agua como torres y canoas de enfriamiento.

- **Definir controles operacionales en procesos productivos**

Gran parte del potencial de ahorro está asociado a los aspectos operacionales de los equipos (Erebril, 2018) por lo que en función de esto es fundamental establecer controles y parámetros para alcanzar los objetivos de eficiencia. Para cada una de las tareas y actividades principales que se definan, se deben definir criterios de operación y mantenimiento, variables relevantes y parámetros de control, responsabilidades, métodos y acciones en caso de emergencia, registros y monitoreo, todo esto debe quedar plasmado en manuales y procedimientos de operación.

- **Evaluar planes para el aumento del volumen de producción**

Como hemos determinado en este estudio, los factores para medir la eficiencia son el consumo del recurso y la capacidad de producción. Por lo tanto, un factor fundamental para la mejora de la eficiencia es el aumento del volumen de productos fabricados. Se recomienda evaluar planes comerciales para el aumento de la demanda y sobre todo evaluar alternativas estratégicas para el aumento de la producción: planificación de la demanda y la producción, manejo de inventario, optimización uso de equipos, aumentar velocidad de producción, disminución de fallas operacionales, de calidad y rechazo de producto, invertir en sistemas de automatización y tecnologías innovadoras, mantener el orden y limpieza de la planta y en general eliminar pérdidas y desperdicios con metodologías tipo LEAN, KAIZEN u otras.

- **Evaluar planes para mejorar la planificación de la producción**

El set up de los equipos de extrusión (funcionamiento de motor y eje y temperaturas de calefacción) representan el peak de amperaje en el funcionamiento de la extrusora, por tanto, es clave disminuir el número de partidas. Se recomienda evaluar alternativas de mejora en la planificación de la producción de tal forma de aprovechar la continuidad de funcionamiento y disponibilidad de equipos. En general, analizar demandas con el área comercial considerando los datos de inventario, para evitar el uso de máquinas para fabricar pequeños lotes. Por el contrario, lo ideal sería agrupar pedidos y proyectar venta fabricando lotes más grandes generando inventario disponible en bodega.

- **Definir y desarrollar competencias del personal y capacitación**

Las personas directamente involucradas en el sistema de eficiencia energética deben contar con las bases teóricas y prácticas para desarrollar los aspectos operacionales que afecten el desempeño, así como estar sensibilizados respecto al consumo consciente de los recursos. Se deben incorporar estas competencias en perfiles de cargo, considerar en los procesos de selección y desarrollar un plan de capacitación que logre cerrar brechas de conocimiento y asegurar que todo el personal involucrado cuenta con estas competencias.

5 CONCLUSIONES

Con este estudio se pudo determinar que sí es posible mejorar la eficiencia del consumo de energía eléctrica y agua en esta fábrica de compuestos poliméricos. Para ello, se utilizó el método DMAIC de Six Sigma, que permite definir estructuradamente un problema y su campo de acción, realizar el levantamiento de información y medición y obtener conclusiones para elaborar un plan de mejora en su análisis. Usando esta herramienta y previo a la definición del problema: ausencia de planes de eficiencia en el uso de energía eléctrica y agua; se logró realizar un levantamiento de información que permitió definir los principales consumos y usos de agua y energía eléctrica, medir y estimar datos, definir indicadores de desempeño, identificar variables significativas que afectan los consumos y visualizar oportunidades de mejora. Esta revisión permitió establecer una línea base y desde allí definir planes estratégicos de acción para aprovechar el potencial de mejora respecto a eficiencia.

Este estudio identificó que el año 2023 esta fábrica requirió de 10,55 m³ de agua y 570,16 kWh para fabricar una tonelada de sus productos. A su vez, se identificó que, de los últimos 3 años, el año 2023 tuvo su más baja performance en eficiencia, ya que, a pesar de tener un consumo de agua y energía eléctrica similar, se tuvo una fuerte baja en el volumen de producción afectando directamente los indicadores de intensidad. Esta información confirma, y considerando los escenarios de inestabilidad climática y escases de recursos, la necesidad imperiosa de implementar mejoras que permitan hacer más eficiente el proceso. Para esto, y respecto al análisis de este estudio, se requiere la implementación de mejoras técnicas y administrativas como la evaluación de nuevos sistemas de enfriamiento o proyectos que logren recircular o reaprovechar el agua, por ejemplo, en los sistemas de extracción por vacío. También se puede mejorar la eficiencia aumentando el volumen de producción. Sin embargo, para que la mejora se convierta en algo sistémico con metas de corto, mediano y largo plazo, es fundamental que la organización establezca la eficiencia energética como pilar estratégico de la compañía, incorporando a la alta dirección para tomar decisiones y asignar recursos, desarrollando las capacidades de su personal para alcanzar las metas.

Adentrándonos a los resultados específicos de este estudio, se logró caracterizar los consumos de energía eléctrica y agua, identificando los procesos que utilizan estos recursos, se estableció el flujo o recorrido a través de los mapas, así como los equipos críticos con mayor consumo o baja eficiencia que bajo ciertas alteraciones o modificaciones podrían bajar o subir la eficiencia. Para el caso del agua resulta fundamental los procesos de enfriamiento de tallarines a través de las torres y bateas de enfriamiento, así como la extracción de gases por el sistema bomba de vacío. Por el lado de la energía eléctrica, se identificó que en el año 2023 la línea de fabricación de productos Blancos es la más eficiente y por el contrario la línea 5 es la que más energía eléctrica necesita para fabricar sus productos. Los motores de las extrusoras y la calefacción para derretimiento son los principales equipos de consumo.

Los resultados de este estudio se obtuvieron usando estructuradamente la metodología DMAIC de Six Sigma, la cual fue aplicada siguiendo casos de estudios expuestos en la revisión de la bibliografía. Paso a paso se definió la problemática, el campo de acción y el caso de estudio, a través de revisión de procedimientos y entrevistas se identificó y entendió el proceso productivo, las principales fallas y oportunidades de mejora. Después se recopilaron datos y estimaron consumos, que se analizaron según indicadores, eficiencia y priorización, y se realizó un análisis causal para proponer acciones de mejora. Las acciones de mejora propuestas van de lo técnico a lo administrativo, priorizando las oportunidades más contundentes en términos de eficiencia, pero también considerado implementar acciones sistémicas que permitan una mejora sostenida en el tiempo. No se consideró en este estudio la última etapa de DMAIC "Control", la cual aporta en el seguimiento y cumplimiento del plan de acción. El uso de este método facilitó el desarrollo de este estudio entregando certeza en la información necesaria y claridad para tomar decisiones y definir prioridades. El uso de esta metodología es altamente recomendado.

Considerando que este estudio concluye que es posible mejorar la eficiencia en el consumo de agua y energía eléctrica, se generó una serie de propuestas para mejorar esa performance con acciones basadas en lo técnico y lo administrativo. En lo técnico se definieron acciones como actualización de tecnologías, implementación de dispositivos y sensores, entre otros. Desde el punto de vista administrativo se proponen acciones como la búsqueda de opciones para aumentar el volumen de fabricación y venta, la implementación de un sistema de gestión

para la eficiencia energética, definición de objetivos y metas y desarrollo de procedimientos o manuales técnicos. A su vez, y en base a ciertos indicios de criticidad, el plan se propuso para revertir la tendencia en procesos o equipos con el mayor consumo o ineficiencia. Por ejemplo, en el caso del agua las medidas técnicas apuntan a disminuir los consumos de agua por ineficiencias en transferencia de calor o en la búsqueda de sistemas de recirculación para el agua de los sistemas de vacío. En la energía eléctrica se definieron acciones para la actualización de motores o un recambio de tecnología en el caso de los calefactores, pasando del uso de resistencias eléctricas a procesos de calentamiento por inductancia magnética. Las principales acciones propuestas del tipo administrativa son la búsqueda de métodos que permitan aumentar el volumen de producción, puesto que a mayor volumen mejor performance del indicador. Estas acciones pueden ir desde la mejora en la predicción de la demanda, planificación de la producción y la implementación de metodologías que permitan eliminar o disminuir pérdidas. Otra medida propuesta es la incorporación de la eficiencia en los pilares estratégicos de la compañía, diseño e implementación de un sistema de gestión de la eficiencia, diseño de procedimientos con métodos que apunten a la eficiencia o entrega de identificación de brechas en competencias a los trabajadores de la fábrica para que desarrollen habilidades de respuesta y consciencia respecto a esta problemática. En adicional, se recomienda que se considere en cada acción propuesta, las posibles externalidades negativas ambientales como la generación de residuos, el aumento de consumos energéticos y emisiones que puedan aumentar la huella de carbono.

Dentro de las dificultades para la realización de este estudio, destacan la ausencia de planos, información técnica de equipos y medidores específicos que hubiesen podido otorgar mayor detalle y calidad de la información, en su defecto, se tuvieron que asumir ciertas condiciones basado en cálculos teóricos o confiando en los relatos y experiencia de los trabajadores de la fábrica, lo que presume cierto margen de error en los resultados. Dicho esto, se recomienda la implementación de medidores de agua, así como la implementación de nuevos medidores o nuevas ubicaciones para los medidores eléctricos de Wenu Work. Esta nueva fuente de datos permitirá tomar decisiones más confiables en base a consumos reales.

Así mismo, se asume como una limitante de este estudio respecto a las acciones ingenieriles propuestas, la falta de desarrollo en este estudio desde el punto de vista de la factibilidad

técnica y económica de implementación. Por tanto, sería interesante proseguir este estudio adentrándose en la determinación de la factibilidad para implementar las medidas propuestas en este estudio o profundizar en alguna problemática específica revelada, como podría ser la falta de eficiencia de los sistemas de enfriamiento o el cambio de equipamiento para la calefacción del plástico. Se recomienda en cada caso considerar evaluaciones de externalidades negativas que permitan mantener o mejorar la neutralidad respecto a residuos, huella hídrica y huella de carbono, entre otros.

Considerando los resultados, este estudio presume una contribución para el desarrollo sustentable de esta fábrica, y una oportunidad para definir lineamientos estratégicos acorde a los años presentes enfrentando así los desafíos respecto a sustentabilidad y productividad que en términos prácticos se traduce en fabricar más y mejor usando menos recursos. Además, y tomando en cuenta la imagen contaminante que se le ha asignado a la industria del plástico, este estudio presume una oportunidad no solo para esta fábrica, sino que quizás, también para la industria del plástico nacional, la crisis hídrica y energética local.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ocampo, S. (2015). Historia del plástico 1. www.academia.edu.
https://www.academia.edu/14743815/Historia_del_plastico_1

Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022 | Aguas subterráneas: Hacer visible el recurso invisible. (s.f.). UNDP.
<https://www.undp.org/es/publicaciones/informe-mundial-de-las-naciones-unidas-sobre-el-desarrollo-de-los-recursos-hidricos-2022-aguas-subterraneas-hacer-visible-el-recurso>

Karki, U., & Rao, P. (2023). Techno-economic analysis of the water, energy, and greenhouse gas emissions impacts from the adoption of water efficiency practices in the U.S. manufacturing sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 196, 107054. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107054>

Marston, L., Ao, Y., Konar, M., Mekonnen, M., & Hoekstra, A. Y. (2018). High-Resolution water footprints of production of the United States. *Water Resources Research*, 54(3), 2288-2316. <https://doi.org/10.1002/2017wr021923>

Rao, P. (2015, 3 agosto). Energy savings from industrial water reductions: <https://escholarship.org/uc/item/2w8348pf>

Estadísticas de consumo Energético Mundial | Enerdata. (s.f.).
<https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>

Eco-efficiency for the dairy processing industry | Dairy Australia
<http://www.eleche.com.uy/media2/design/style000001/0000000030000001438.pdf>

Harry, M. and Schroeder, R. (2000) *Six Sigma The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the world's Top Corporations*. Doubleday, New York. - References - Scientific Research Publishing. (s.f.).
<https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1192326>

Linderman, K., Schroeder, R. G., Zaheer, S., & Choo, A. S. (2002). Six sigma: A goal-theoretic perspective. *Journal of Operations Management*, 21(2), 193-203. [https://doi.org/10.1016/s0272-6963\(02\)00087-6](https://doi.org/10.1016/s0272-6963(02)00087-6)

Erdil, N. O., Aktaş, C. B., & Arani, O. M. (2018). Embedding sustainability in lean six Sigma efforts. *Journal of Cleaner Production*, 198, 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.048>

De Mast, J., & Lokkerbol, J. (2012). An analysis of the six sigma DMAIC method from the perspective of problem solving. *International Journal of Production Economics*, 139(2), 604-614. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.05.035>

Kaswan, M. S., & Rathi, R. (2020). Green Lean Six Sigma for Sustainable Development: Integration and Framework. *Environmental Impact Assessment Review*, 83, 106396. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106396>

Antony, J., Snee, R. D., & Hoerl, R. W. (2017). Lean Six Sigma: Yesterday, today and tomorrow. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 34(7), 1073-1093. <https://doi.org/10.1108/ijqrm-03-2016-0035>

Calia, R. C., Guerrini, F. M., & De Castro, M. (2009). The impact of six Sigma in the performance of a pollution prevention program. *Journal of Cleaner Production*, 17(15), 1303-1310. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.05.001>

Delgadillo, R. R., Medini, K., & Wuest, T. (2022). A DMAIC Framework to Improve Quality and Sustainability in Additive Manufacturing—A Case Study. *Sustainability*, 14(1), 581. <https://doi.org/10.3390/su14010581>

Srinivasan, K., Muthu, S., Devadasan, S., & Sugumaran, C. (2014). Enhancing effectiveness of shell and tube heat exchanger through six SIGMA DMAIC phases. *Procedia Engineering*, 97, 2064-2071. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.449>

Ranade, P. B., Reddy, G. G., Koppal, P., Paithankar, A., & Shevale, S. (2021). Implementation of DMAIC methodology in green sand-casting process. *Materials Today: Proceedings*, 42, 500-507. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.475>

Ángel, C. P. (2013, 20 marzo). Estudio de reducción del consumo de agua desmineralizada de una central térmica de ciclo combinado aplicando la estrategia Six Sigma. Universidad de Cádiz. <https://rodin.uca.es/handle/10498/15103?show=full>

Sakti, S. C. W., Sopha, B. M., & Saputra, E. (2021). Energy efficiency analysis in a textile company using DMAIC approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1096(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1096/1/012007>

Tian, F., Zhang, Y., Wang, X., & Li, Y. (2018). Application of lean six sigma in energy saving lamp assembly process. *Journal of Physics: Conference Series*, 1053, 012129. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1053/1/012129>

Karki, U., & Rao, P. (2023b). Techno-economic analysis of the water, energy, and greenhouse gas emissions impacts from the adoption of water efficiency practices in the U.S. manufacturing sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 196, 107054. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107054>

Mariano. (s. f.). EXTRUSIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS. Tecnología de los Plásticos. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>

Caloryfrio, I. A. (2018, 17 agosto). ¿Qué es una torre de refrigeración o enfriamiento? funcionamiento y seguridad. caloryfrio.com. <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion->

